

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

ББК 22.61

С91

УДК 522.61

Суханов А.Г. Панорамная астрофотография. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. — 88с.

Книга посвящена одному из методов астрономических исследований — панорамной фотографии и ее различным приложениям. Излагается история панорамных методов фотографирования и развитие их на базе современной оптики. Рассматриваются некоторые источники ошибок, сопутствующих процессу фотографирования, и возможные пути их частичного устранения. Показаны преимущества и недостатки панорамного метода фотографирования по сравнению с обычным, покадровым.

Книга может быть полезна занимающимся вопросами применения "малой" оптики в астрономических исследованиях, а также лицам, интересующимся фотографией.

Табл. 1. Ил. 44. Библиогр. 26 назв.

СОДЕРЖАНИЕ

От автора	4
§ 1. Значение фотографии для астрономии	7
§ 2. Краткая история астрофотографии	13
§ 3. Основные этапы создания фотографических объективов	16
§ 4. Оптика панорамных фотокамер	19
§ 5. Выбор параметров панорамной фотокамеры	28
§ 6. Выбор параметров гйда к панорамной фотокамере	36
§ 7. Искажения поля изображений при панорамном фотографировании	42
§ 8. Растяжение изображений звезд в процессе фотографирования	46
§ 9. Неровности пленки и ее деформации со временем	51
§ 10. Определение положения ИСЗ путем замещения его изображения в фокальной плоскости панорамной фотокамеры фиксативным репером	57
§ 11. Преобразование координат при панорамном фотографировании	64
§ 12. Роторная панорамная камера для фотографирования метеоров	70
§ 13. Некоторые другие применения панорамного фотографирования	75
§ 14. Сравнение преимуществ и недостатков панорамного и покадрового методов фотографирования в астрономии	83
Список литературы	87

ОТ АВТОРА

Астрономические исследования не всегда производятся с помощью крупных оптических инструментов. Очень большая группа небесных объектов в силу специфических особенностей своего строения, протяженности, динамики или яркости требует применения для исследования сравнительно скромной оптики с фокусными расстояниями до одного метра и диаметрами объективов до 25—30 сантиметров. Фотокамеры, обладающие параметрами, заключенными в указанных выше пределах, обычно называют "малыми". Это определение довольно условно, так как нет общепринятых жестких критериев деления камер на "большие" и "малые".

Малая оптика применяется при исследовании метеорных явлений, изучении серебристых облаков, зодиакального свечения, заревых явлений, искусственных небесных тел. В ряде случаев малая оптика используется как составная часть сложного оптического комплекса в качестве преобразующего световой поток элемента или в каких-либо иных целях. Обладая низкой стоимостью, малыми габаритами и высокой транспортабельностью, фотокамеры, снабженные этой оптикой, получили весьма широкое распространение в практике астрономических исследований. Такому положению способствует получаемый довольно высокий уровень информации, обусловленный устойчивостью оптических характеристик во времени.

Как один из примеров применения подобных малых камер можно привести создание Гансом Ференбергом обзорного фотографического атласа, известного под названием "Фалькгауэрского атласа". Он содержит звезды до 13,5 звездной величины, имеет масштаб около $14' \text{ мм}^{-1}$ в центре поля, что позволяет использовать атлас при различных астрофизических и астрометрических исследованиях. Атлас состоит из 428 карт всего неба с необходимым перекрытием соседних полей. Создан этот атлас с помощью очень скромной оптики: диаметр объектива камеры 71 мм, фокусное расстояние 250 мм. Примеров подобного рода можно было бы привести много.

Панорамная фотография в силу своих технологических особенностей использует, как правило, малую оптику, чаще всего так называемую "штатную" — такую, которой снабжаются самые разнообразные фотографические устройства, выпускаемые промышленностью большими сериями.

Многие преимущества панорамного метода фотографирования все чаще и чаще заставляют прибегать к нему при решении многих задач астрономии — таких, например, как фотографи-

рование протяженных объектов или задач слежения за быстро-перемещающимися искусственными объектами на больших участках их видимых траекторий. Большая информационная емкость, а также возможность частичного ослабления влияния аберраций питающей оптики позволяют применять в совокупности с панорамным методом статистическую обработку полученной информации на ЭВМ, достигая значительного выигрыша в удельной информации с единицы площади снимка.

Было бы весьма затруднительно рассматривать примеры эффективного применения панорамного метода при решении различных задач с использованием оптики самых разнообразных параметров. Поэтому далее везде, где это не оговорено специально, все экспериментальные данные для удобства изложения приведены относительно "базового" (в данной книге) объектива типа "Индустар-52", широко применяющегося в различных областях исследований. Объектив "Индустар-52" имеет диаметр 100 мм, фокусное расстояние 500 мм, рабочее угловое поле около 50° , масштаб в центре поля около $412,5 \text{ мм}^{-1}$, его оптическая схема — триплет, у которого одна линза двойная. Объектив обладает довольно хорошо исправленными аберрациями III порядка, световое уравнение его поля вполне удовлетворительно даже для выполнения некоторых астрофизических работ; астрометрические характеристики его также вполне удовлетворительны. Кроме того, по своим техническим особенностям объектив допускает тонкую фокусировку путем малых перемещений передней линзы вдоль оптической оси, что весьма немаловажно при юстировке оптической системы в целом. Добавим, что виньетирование у этого объектива незначительно, он имеет малое светоплощение, компактен и сравнительно легок. Первоначально предназначенный для аэрофотосъемки, этот объектив получил применение в астрономических исследованиях самых разнообразных направлений.

В последние годы интерес оптиков к системам типа "триплет" снова возрос в связи с появлением новых сортов оптических стекол, позволяющих устранить некоторые недостатки, присущие данной системе, о чем можно судить по стойкой тенденции к замене многолинзовых объективов объективами типа "триплет" в любительских фотокамерах. За рубежом появились разработки длиннофокусных триплетов для научных исследований. Поэтому автор считает базирование изложения именно на этом типе объективов вполне закономерным в настоящее время, тем более что экстраполяция оптических возможностей панорамных систем при условии применения других объективов не представляет особых трудностей, если не требовать очень высокой точности.

Основной целью при написании данной книги было желание автора привлечь внимание к широким возможностям панорамной фотографии в астрономических исследованиях. Автор не ставит перед собой задачи изложить все способы получения

панорамных изображений: совершенно не рассматриваются способы построчного получения панорамных разверток с помощью фотозлектрического или телевизионного сканирования и передачи информации с помощью телеметрического канала радиосвязи. Рассматривается прямой, непосредственный метод получения панорамных фотоснимков и в комбинации его с методом замещения реального изображения его фиктивным изображением, полученным с помощью вспомогательных оптических устройств. Затрагиваются причины ухудшения качества полученных изображений и возможные способы частичного преодоления их влияния.

Более подробно рассмотрены области применения панорамной фотографии для исследования искусственных небесных тел и метеорных явлений. Вместе с тем автор посчитал необходимым изложить и историю развития фотографии и фотографической оптики — широкоугольной и панорамной, поскольку сведения о последней разбросаны в чрезвычайно большом количестве литературных источников, в некоторых случаях забытых, а иногда просто труднодоступных.

Автор благодарит сотрудников Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга за многие замечания, высказанные в процессе работы над книгой, и ценные советы. Автор благодарит Е.А. Карнаух за ту большую помощь, которая была оказана ею во время подготовки книги к печати.

Автор будет очень признателен всем, кто выскажет критические замечания о содержании книги.

А.Г. Суханов

§ 1. Значение фотографии для астрономии

Бурное развитие астрономии и в особенности ее новой отрасли — астрофизики в конце XIX и начале XX вв. стимулировалось широким применением фотографического процесса для получения объективных документальных данных о состоянии небесных тел и его изменениях. Астрометрия также чрезвычайно интенсивно использовала в этот же период для получения точных положений небесных светил и широко использует в настоящее время фотографический метод при решении своих весьма разнообразных задач. Трудно назвать какую-либо отрасль современной астрономии, которая в той или иной мере не пользовалась бы фотографией.

Астрометрическая фотография, являясь разделом научной фотографии, отличается от других разделов последней значительными спектральными пределами фиксируемых излучений небесных объектов, ограниченными в известной степени свойствами земной атмосферы.

Диапазон применения техники астропhotографии необычайно широк: от самых слабых объектов, фиксируемых с помощью фотографии крупнейшими телескопами, до самого яркого — Солнца, отличающегося от них по световому потоку почти в 10^{11} раз; от телескопа с диаметром объектива 605 см и фокусным расстоянием около 349 м до крошечных фотокамер с диаметром объектива менее сантиметра и с фокусным расстоянием такого же порядка; от относительных отверстий порядка 1:100 до 1:0,5; от времени экспозиции менее тысячной доли секунды до многих часов; от съемки в интегральном свете до съемки в спектральных интервалах шириной менее одного ангстрема; от съемки ничтожной доли объекта (детали поверхности Солнца, Луны, планет, комет) до съемки тысяч объектов на одном негативе.

Наличие искажающего световой поток влияния земной атмосферы, перемещение светил в поле зрения вследствие суточного вращения небесной сферы, реальные перемещения светил относительно фона неподвижных звезд (планеты, кометы, метеоры, ИСЗ), быстрые изменения яркости светил (переменные звезды, метеоры, ИСЗ, вспышки на Солнце), кратковременность явлений (метеоры, вспышки на Солнце, затмения Солнца и Луны), панорамность объектов (Млечный Путь, зодиакальный свет, серебристые облака, кометы с протяженными хвостами) — все эти явления, вместе взятые, и определяют тот факт, что астропhotография конца XX в. должна обладать и обладает, пожалуй, самым значительным из всех областей естествознания арсеналом разнообразнейших экспериментальных средств.

Массовость применения фотографии в астрономии просто подавляет воображение: многие обсерватории обладают в настоящее время коллекциями астронегативов, состоящими из сотен тысяч экземпляров. Это самые настоящие клады для исследователей, если еще учесть, что эти коллекции охватывают период времени, близкий к ста годам.

Снимки одного и того же небесного объекта, полученные через некоторые промежутки времени (для теп Солнечной системы это интервалы от сотых долей секунды до нескольких суток или даже десятков суток, для некоторых объектов из звездного населения это иногда многие десятки лет), позволяют проследить в удобных лабораторных условиях за изменением или характера изучаемых объектов, или их взаимного расположения, используя различную вспомогательную аппаратуру.

Огромные преимущества фотографии перед другими методами исследований оставляют ей всегда одно из первых мест при решении практических задач современной астрономии, несмотря на быстрое развитие фотоэлектрических, электронно-оптических, телевизионных и других методов, нашедших применение в астрономии наших дней.

На базе общей теории информации разрабатываются теоретические (и с успехом применяются на практике) методы изучения фотоснимков, что позволило значительно увеличить объем извлекаемой полезной информации с единицы поверхности фотоснимка. Успешно развиваются автоматические методы измерения и анализа фотографической информации с помощью специализированных ЭВМ.

В последние годы значительно повысилось качество фотографических материалов, их чувствительность; разрабатываются новые методы sensibilization эмульсий, приведшие к расширению диапазона спектральной чувствительности, особенно в красной и инфракрасной областях спектра, в практику внедряются и новые, более эффективные методы химической обработки снимков с целью повышения их информационной емкости. Во всем этом есть весьма значительная заслуга советских исследователей.

Какими же особыми качествами обладает фотография, что находит такое широкое применение в астрономии? Пожалуй, достаточно перечислить основные ее качества, чтобы стало ясно, почему фотография является одним из наиболее мощных средств научного исследования.

1. Интегральность. Фотографическая эмульсия способна накапливать действие светового потока в какой-либо точке во времени, что позволяет получить на астрономическом изображении светил, не видимых глазом даже в телескоп. Следует отметить, что это накопление ограничено во времени некоторыми условиями. Так, увеличивая время экспозиции приблизительно в три раза, мы получим на фотоснимке изображение звезд примерно на одну звездную величину более слабых, чем с предыдущей экспозицией. Но если увеличивать экспозицию в 50 — 100 раз, то возникает риск получить полностью завуалированный рассеянным светом снимок.

2. Панорамность. Важное свойство фотографии: на фотографической пластинке или фотопленке фиксируется большое число небесных светил: звезд, туманностей и др. Величина поля изображений определяется физико-геометрическими свойствами объектива фотокамеры и размерами фотопластинки. Все небесные объекты фиксируются одновременно с нарушениями подобия поля изображения за счет аберраций объектива.

3. Документальность. Фотоснимок является документом, который сформирован практически независимо от субъективных особенностей наблюдателя и фиксирует для будущих поколений вид звездного неба для эпохи фотографирования. Подвергнутый специальной обработке фотоснимок может сохраняться неопределенно долго; так, многие снимки, полученные

более ста лет тому назад, сохранились до нашего времени настолько хорошо, что их и сейчас можно использовать в научных целях.

4. Детальность. Особое свойство фотографической эмульсии, заключающееся в том, что в поле изображения фиксируются все элементы объекта, разрешение которых определяется свойствами оптической системы и зависит от яркости объекта или его элементов и чувствительности фотопластинки.

5. Моментальность. Свойство фотографической эмульсии фиксировать при соответствующих условиях чрезвычайно кратковременные явления и процессы, длительность которых может составлять малые доли секунды времени.

Перечисленные пять основных свойств фотографии определили ей одно из первых мест среди современных методов научных исследований. Поэтому все современные астрономические обсерватории имеют строго охраняемые "стеклянные" библиотеки — собрания астронегативов, полученных с помощью различных астрографов и телескопов, снабженных фотографическими устройствами. Каждый негатив маркируется некоторыми данными, совершенно необходимыми для его обработки: наименованием объекта, датой фотографирования, координатами центра поля и величиной времени экспозиции и т.п.

Следует отметить, что при всех достоинствах фотографического метода в его адрес должны прозвучать и некоторые критические замечания.

Астрономическая фотография обязана нести нам информацию об исследуемом объекте, которая должна являться астрономическим фактом. Автор не испытывает никакого чувства вины перед фотографией, приводя парадоксальное заявление Х. Бонди, сделанное им в 1955 г.: "Что такое астрономический факт? Это грязное пятно на фотопластинке!" Если неискушенному в астрофотографии читателю показать, например, негатив с изображением туманности Орiona, то он вполне согласится с приведенным выше утверждением Х. Бонди: фотоснимок настолько напоминает случайное, бесформенное пятно, что только специалист может спокойно заниматься изучением негатива с целью получения какой-либо информации о сфотографированном объекте. Невольно возникает вопрос: как же получают астрономы достоверные сведения об интересующем их небесном объекте? Ведь фотографическая система, включающая в себя объектив, промежуточную оптику и фотозмульсию, обладает целым рядом весьма существенных недостатков. Отметим из их числа главнейшие.

1. Аберрации фотографических объективов. Ошибки объективов: сферическая и хроматическая аберрации, кома, астигматизм и дисторсия — все они в различной мере искажают поступающую в фотографическую систему информацию, искажают как изображение отдельного объекта, так и поле изображений в целом. Современные фотографические объективы еще довольно далеки от желаемого совершенства, несмотря на применение для их расчетов мощных современных ЭВМ: полностью устранить аберрации современная теория фотографических объективов не может. Поэтому оптическая система после ее изготовления будет обладать далеко не теми характеристиками, которые были положены в основу расчетов, и потребителю приходится мириться с таким положением, прибегая к самым различ-

ным ухищрениям, чтобы "выжать" из полученной оптики максимум возможного.

2. Ограниченность поля изображений. Самые современные оптические системы позволяют получить изображения целой полусферы и всех находящихся на ней небесных светил. Но это достигается ценой искажения и потери большей части информации о поле изображений в целом. Поэтому на практике ограничивают величину поперечника поля в зависимости от поставленной задачи. Так, для некоторых задач астрономии приходится использовать очень малые угловые поля, порядка нескольких минут дуги. Например, крупнейший в мире телескоп с оптикой диаметром 605 см позволяет при исследованиях в главном фокусе реализовать поле всего $5'-6'$ в поперечнике. Это поле лишено аберраций, значительно искажающих информацию, и имеет линейный поперечник около 40 мм! С помощью дополнительной коррекционной оптики можно увеличить размер поля в главном фокусе до $13'$, что составит в линейной мере около 90 мм. Как видим, размеры оптической системы еще ничего не говорят о размерах рабочего поля изображений данного инструмента: последнее является функцией целого ряда различных факторов. Как правило, зеркальные системы имеют при одинаковых фокусных расстояниях значительно меньшие угловые поля изображения, нежели линзовые. Зеркально-линзовые системы по размерам угловых полей занимают промежуточное положение между чисто зеркальными и линзовыми системами.

3. Световое уравнение поля изображений. Эта ошибка оптической системы характеризует светораспределение по полю в функции расстояния от оптического центра последнего. В первом, самом грубом, приближении освещенность от центра поля к его периферии убывает пропорционально $\cos^4 \omega^\circ$ (ω° — угол от центра поля зрения). Следствием этого недостатка оптики является неравномерное распределение освещенности по всему полю изображений, и иногда это распределение настолько сложно, что требует для его учета специальных лабораторных исследований.

4. Вторичные эффекты изменения состояния фотографической эмульсии. Они возникают в процессе фотографирования, проявления и фиксирования изображений, а также и в процессе хранения и исследований астронегативов, если не соблюдаются некоторые выработанные в процессе длительной практики фотографии условия. Например, при длительном хранении в режиме частей и значительных по величине изменений температуры и влажности могут иметь место значительные линейные деформации, различные на астронегативе по разным направлениям; под воздействием летучих химических соединений может измениться плотность почернения негатива. Контролировать подобные изменения весьма трудно, иногда даже невозможно, поэтому условия хранения должны подчиняться определенным правилам.

Перечисленные недостатки фотографического метода охарактеризованы в общих чертах. Искажение информации, запечатленной на астронегативе, носит сложный характер и требует для его учета подчас сложных исследований, не всегда дающих уверенные результаты.

Рассмотрим в качестве примера схему процесса передачи информации, несомой световым потоком от какого-либо светящегося тела, через фотографическую систему, обладающую всеми указанными выше достоинства-

ми и недостатками. Наиболее сложным является случай несамосвещающегося тела, рассеивающего свет постороннего источника. Этот случай представлен на рис. 1.

Пусть светящееся тело M_0 испускает световой поток во всем диапазоне электромагнитных волн, а освещенное им тело M рассеивает селективно падающий на него свет по произвольным направлениям, причем для различных частей освещаемого тела это рассеяние различно по характеру. Упавший на тело световой поток Φ_0 при рассеянии испытывает как качественное, так и количественное изменение.

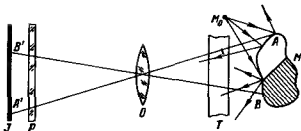


Рис. 1. Схема переноса информации в фотографии.

Во входное отверстие оптической системы O , преобразующей входящую информацию, войдет поток $\Phi_1 < \Phi_0$, испытав поглощение на пути от освещенного тела M до фотогографической системы за счет среды T , находящейся между ними (межзвездная среда, атмосферное поглощение и т.п.). Проходя через систему линз и зеркал объектива O , световой поток еще несколько уменьшится до значения $\Phi_2 < \Phi_1$ за счет поглощения в стекле и неполного отражения от поверхностей зеркал. Кроме того, на пути светового потока часто располагаются различные оптические элементы P , предназначенные для необходимых наблюдателю изменений светового потока (светофильтры, поляризаторы, призмы и т.п.), за счет которых световой поток еще уменьшится до значения Φ_3 .

Упавший на фотографическую эмульсию J поток частично отражается от поверхности последней, частично поглощается, испытывая рассеяние внутри эмульсии, и только некоторая доля потока, проникшего внутрь эмульсии, взаимодействует с ее светочувствительными зернами. Если принять величину потока, упавшего на эмульсию, за 100%, то, согласно современным данным об эмульсиях, всего какие-нибудь 1–6% от этого потока активно взаимодействуют с зернами эмульсии. Изображение $A'B'$ рассеивающего свет тела, естественно, не будет соответствовать по энергетическим характеристикам самому телу AB . К тому же фотографическая эмульсия имеет различную чувствительность к лучам различных длин волн, поэтому неизбежен вывод о малой восприимчивости фотографического процесса в целом.

Таким образом, после отражения от поверхности рассеивающего тела световой поток обладает уже иным, чем вначале, распределением амплитуд, фаз и собственным распределением амплитуд по длинам волн, реакция же эмульсии в первом приближении пропорциональна только интенсивности

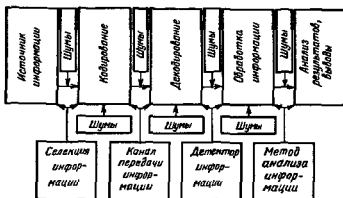


Рис. 2. Цепочка Шеннона.

потока (квадрату амплитуды световых волн, взаимодействующих с эмульсией) и не зависит от фазовых соотношений, несущих информацию о пространственной структуре объекта M и в конечном результате после проявления (которое тоже вносит свой вклад в изменение характера зарегистрированного потока ...) получается сильно искаженная информация об исследуемом объекте. Существует много экспериментальных приемов и методов, снижающих потери информации при фотографировании, но все же точного подобия объекту исследования с помощью фотографии получить нельзя.

К числу таких приемов можно отнести повторное фотографирование объекта (правда, далеко не всегда возможное). Тогда достоверность зарегистрированных на фотографической эмульсии фактов станет значительно выше. Поскольку эмульсия состоит из отдельных зерен, последние можно считать дискретными посетителями информации об упавшем на эмульсию световом потоке. На одном квадратном миллиметре площади эмульсии может располагаться от 1000 до 2000 (а в некоторых случаях и больше) зерен, среди которых, несомненно, есть такие, которые обязаны своим происхождением не внешним причинам, а внутренним: загрязнению эмульсии, электрическим процессам, связанным с особыми свойствами эмульсии и ее подложки, процессу проявления и фиксирования и т.п. Применение статистических методов в сочетании с обработкой на ЭВМ позволяет, располагая несколькими негативами, до некоторой степени "очистить" результаты от подобных помех.

Представим теперь весь процесс передачи информации в виде известной в теории информации "цепочки" Шеннона, связывающей воедино все процессы, происходящие, начиная от момента действия источника информации на фотоэмульсию до получения выводов после обработки информации. Схематически цепочка Шеннона представлена на рис. 2. Здесь под шумами мы понимаем самые разнообразные искажения информации, часть которых перечислена выше. Цепочка Шеннона свидетельствует о том, что при любом эксперименте часть информации теряется за счет шумов, "проникающих" в цепочку на всех этапах исследовательского процесса. Сказанное выше це-

ликом и полностью относится в астрофотографии к исследованию как самосветящихся небесных объектов любой протяженности, так и несамосветящихся. В различных вариантах экспериментальных комплексов могут возникать такие условия, при которых отдельные звенья цепочки выпадают, но в целом она имеет место всегда, при любом эксперименте. В задачу исследователя входит поиск таких систем, которые обладали бы наименьшими шумами.

§ 2. Краткая история астрофотографии

Официальной датой изобретения фотографии считается 14 августа 1839 г. Но еще задолго до этой даты велись поиски способов закрепления оптического изображения, полученного с помощью камеры-обскуры или простой линзы.

Наиболее давним, документально подтверждаемым сообщением о такого рода поисках является сообщение Фабрициуса в 1556 г. об опытах с хлористым серебром: он заметил, что раствор последнего с какими-то неизвестными примесями темнеет на свету Солнца. Фабрициус справедливо считал, что такое свойство раствора можно использовать для получения изображений на бумаге, смоченной подобным раствором, но о дальнейших его опытах ничего не известно. Бойль в 1686 г. установил, что некоторые соли золота светочувствительны, но так же, как и Фабрициус, свои опыты не продолжил. Несколько позже, в 1725 г., русский химик-любитель А.П. Бестужев-Рюмин, исследуя растворы солей железа, обнаружил эффект потемнения раствора последнего под действием солнечного света. В 1777–1782 гг. химики Шееле и Сенебье обнаружили эффект разложения солей серебра под действием солнечного света, а физик и химик Шарль, хорошо осведомленный об этих опытах, безуспешно пытался получить на бумаге, пропитанной солями серебра, силуэты предметов, наложенных на бумагу и освещаемых Солнцем. Однако при хранении даже в течение незначительных промежутков времени силуэты, полученные Шарлем, исчезали. Будучи не в силах объяснить этот эффект, ученый опыты прекратил. По иронии судьбы в распоряжении Шарля был гипосульфит натрия, хотя и не чистый химически. Шарль пробовал закрепить изображение каким-то путем, но положительных результатов не получил. В 1802 г. Дэви много сил и времени потратил на поиски способов закрепления изображения, но успеха, как и все его предшественники на этом поприще, не имел.

Имеются несомненные документальные данные о том, что 8 мая 1816 г. Ньепс в письме к своему брату сообщал об успехе не только в получении, но и закреплении, по его словам, "гелиографического" изображения (полученного опять же под действием солнечного света). К сожалению, этот первый фотоснимок утерян, неизвестен даже сюжет съемки.

Опыты по закреплению изображений, полученных с помощью солей серебра, привлекли внимание ученых, так как была совершенно ясна важность поисков в данной области науки. Крупнейший, не потерявший своего значения до настоящего времени успех выпал на долю Джона Гершеля, сына великого астронома Вильяма Гершеля в 1819 г. После длительных поисков и проб, производившихся совершенно вслепую, Джон Гершель обнаружил, что устойчивое во времени закрепление изображений,

полученных с помощью галлоидных солей серебра, можно производить с помощью серноватисто-кислого натрия, называемого гипосульфитом. В распоряжении Джона Гершеля были только бромистое и хлористое серебро, с которыми он и экспериментировал. В 1822 г. Ньепс получал на асфальтовой пластинке с твердой подложкой из металла без применения солей серебра рельефные изображения при очень больших экспозициях под действием солнечного света. В 1826 г. к опытам Ньепса подключился Дагерр. Несколько лет их совместных усилий к успеху не привели. Однако в 1835 г., уже после смерти Ньепса Дагерр получил патент на "способ получения и закрепления изображений" при помощи пластинок, покрытых галлоидными солями серебра. Не существует доказательств того, что Дагерру было известно об опытах Джона Гершеля, вероятно, он сам нашел способ закрепления изображения путем многочисленных проб, с помощью гипосульфита. Результаты Дагерра были чрезвычайно впечатляющими, они получили очень быстро широкую известность, и 14 августа 1839 г. Араго сообщил о них Французской Академии наук. Сообщение вызвало огромный интерес ученых, и о нем стало известно за пределами Франции. Дату же 14 августа 1839 г. принято считать официальной датой рождения фотографии. В этом же 1839 г. Тальбот сообщил о способе получения изображений на бумаге по методу Дагерра.

Первыми, кто обратил внимание на фотографию как новый научный метод, были астрономы: они поняли, что получили в свое распоряжение мощный инструмент исследований, и уже в 1840 г. Дрепер в Нью-Йорке получил с помощью довольно небольшого телескопа снимок Луны диаметром около 25 миллиметров с массой деталей на нем. Снимок вызвал справедливое восхищение астрономов. Он был получен в марте 1840 г. (точная дата неизвестна), поэтому март 1840 г. считается датой рождения астрофотографии как самостоятельного раздела астрономии.

В России исследования в области фотографии велись весьма интенсивно. Русский фотограф А.Ф. Греков в 1841 г. сообщил о большой серии успешных опытов по фотографированию прямо на бумаге; при этом он опубликовал способ цветного тонирования фотоснимков, что в очень большой степени способствовало популяризации фотографии вообще. Работы Грекова были широко известны за рубежом, в частности в САСШ (как тогда именовались США), однако при использовании работ Грекова ссылки на его авторство отсутствовали, и только в начале текущего века авторство Грекова было документально доказано.

Парадоксально, по факт: самое яркое светило Солнце, для съемки которого необходима ничтожно малая экспозиция, было сфотографировано далеко не первым. . .

Способ Дагерра, несмотря на его широкую доступность, имел весьма существенное ограничение: приготовление пластинок необходимо было производить в темном помещении и использовать их сразу же, в непротушенном состоянии (в результате сушки они теряли свою светочувствительность и поверхность их становилась неоднородной в этом отношении). Поэтому способ Дагерра назывался "мокрым". 1848 год ознаменовался тем, что вместо металлических подложек стали применять стеклянные, более устойчивые в химическом отношении и совершенно нейтральные по отношению к веществу светочувствительного слоя.

В середине XIX в. произошло знаменательное событие: русский фотограф С.Л. Левицкий (ему принадлежат прекрасно исполненные и имеющие огромную документальную ценность одиночные и групповые снимки выдающихся деятелей русской науки и культуры, а также государственных деятелей) изобрел фотослой сложного состава: бромидосеребряную эмульсию с чувствительностью на порядок более высокой, нежели чувствительность самых лучших зарубежных эмульсий, полученных по способу Дагерра. За эту работу Левицкий получил на Всемирной выставке в Париже в 1851 г. золотую медаль: таким успехом озаменовался результат его многолетней работы!

В 1851 г. Арчер в Англии применил для изготовления фотографических эмульсий коллодий. Этот способ, как и способ Дагерра, был "мокрым", поэтому существенного изменения процесс фотографирования не получил. Интересно отметить такой факт: светопередача эмульсий при "мокрой" фотографическом процессе была весьма высококачественной, несколько не хуже, чем при современных фотографических материалах (возможно, в некоторых случаях даже и лучше!).

В середине XIX в. было положено начало систематическому фотографированию светил — комет, планет, Солнца, Луны, звезд. Надар, поднявшись на воздушном шаре, впервые сфотографировал участок поверхности Земли — датой рождения аэрофотосъемки можно считать 1859 год. Известно несколько опытов применения фотографии в военном деле, при географических исследованиях. Но в области научных исследований с применением фотографии безусловно главенствовали астрономы.

Очень крупным шагом в фотографии было изобретение сухих, бромосеребряных пластинок на стеклянной подложке — фотография стала практически общедоступной, ибо пластинки можно было заготавливать впрок; возникли фабрики фотопластинок. Спектральный диапазон чувствительности фотопластинок был расширен Фогелем в 1873 г. в желтую, оранжевую и красную части спектра, а в 1874 г. Абиеем — в далекую красную область спектра. Астрономы не замедлили использовать эти достижения: началась эпоха фотографирования спектров светил, получила большой стимул для своего развития астроспектроскопия.

В 1878—1879 гг. случайно было обнаружена способность раствора аммиака повышать светочувствительность эмульсий; этот способ аммиачной сенсibilизации применяется до настоящего времени вследствие своей доступности и простоты. В 1880 г. русский исследователь И.В. Болдырев сделал дальнейший шаг в совершенствовании фотографических материалов: изготовил фотопленку на эластичной смолистой основе — первую в мире успешно применявшуюся на практике фотопленку, а в 1883 г. С.А. Юрковский запатентовал великолепный щелевой затвор переменной ширины, сыгравший значительную роль в астрофотографии Солнца. Затворы на основе идей Юрковского конструируются до сих пор.

Изобретение метода цветного фотографирования приписывается американцу Липпману, сообщившему о своем способе в 1891 г. и получившему патент. Однако еще в 1889 г. в России Э.Козловский удачно решил проблему цветной фотографии. Липпману работы Козловского были очень хорошо известны, но он умело использовал прессу для рекламы

своего "изобретения", в результате приоритет Козловского был попросту скрыт от общественности...

К концу прошлого века применение фотографии в астрономии привело к настоящему перевороту: огромное число раз возросла интенсивность астрономических исследований и их информативность.

Русские астрономы не только широко применяли фотографический метод в своих исследованиях, но и внесли в него много существенных усовершенствований, а также обнаружили несколько эффектов, которые сопутствуют процессу получения изображения и обработки фотоснимков. Вклад русских исследователей в развитие фотографии вообще и астрофотографии в частности очень велик и общепризнан.

Двадцатый век ознаменовался в основном работами в направлении повышения свето- и светочувствительности эмульсий, улучшения их структур (уменьшение размеров зерен светочувствительных агентов), создания противоореольных слоев, создания защитных наружных слоев над поверхностью эмульсии и разработок новых методов проявления, обработки и хранения экспонированных фотоматериалов. В частности, получены эмульсии, чувствительные к ближней инфракрасной области спектра, разработаны эмульсии для получения цветных изображений — негативные и обратимые, созданы эмульсии с разрешением до 1500 и более линий на миллиметр. Но основные усилия направлены на увеличение светочувствительности — повышение квантового выхода светочувствительных слоев. В этом направлении необходимы, вероятно, решения, основанные на неконсервативных методах, используемых в настоящее время. Таковы вкратце основные вехи возникновения и развития фотографического метода исследований и его применения в астрономии.

§ 3. Основные этапы создания фотографических объективов

Однако для получения высококачественных фотоснимков любых объектов необходима еще и оптическая система, строящая изображение — своего рода посредник между объектом исследования и фотоэмульсией, на которой запечатлевается передаваемая информация. Роль этого посредника очень велика, так как он является одновременно и системой фильтрации информации, поступающей от объекта. В общем случае эта система играет одновременно две роли: передает информацию и вносит в нее шумы, иногда настолько значительные, что полезная информация подчас буквально затушевывается ими.

С самого момента изобретения фотографического процесса началось и совершенствование оптических систем — объективов для получения изображений при фотографировании. Визуальные оптические системы к этому времени получили некоторое довольно удовлетворительное развитие благодаря работам Кеплера, Ньютона и других исследователей, в числе которых нужно назвать Фраунгофера. Фотографические системы не имели прототипов по назначению, если не считать проекционные системы очень низкого качества. Поэтому первый период развития фотографической оптики характерен чистым эмпиризмом: никакой теории сложных, необходимых для фотографирования систем не было, и поиск вел-

ся методом подбора различных комбинаций линз с последующим их исследованием на пригодность в той или иной области фотографии.

Справедливости ради необходимо заметить, что в 1804 г., когда фотографический процесс не был еще известен, занимавшийся многими вопросами физики знаменитый английский врач Волластон предложил довольно удачную линзу для камеры-обскуры. Последние широко применялись для ландшафтных зарисовок, снятия планов местности или архитектурных исследований, так как обладали довольно большим угловым полем и незначительными искажениями геометрии объекта в поле изображений. Линза Волластона представляла собой положительный выпукло-вогнутый мениск, обращенный вогнутой стороной к объекту зарисовки. Относительное отверстие таких менисков было обычно весьма малым — порядка 1:20 — 1:50, поэтому их aberrациями можно было пренебречь. Хорошее распределение освещенности по полю изображений, простота и низкая стоимость таких объективов привели к их быстрому распространению (мениски Волластона употреблялись до сих пор в качестве объективов простейших фотографических аппаратов).

Первые работы по исследованию и вычислению aberrации оптических систем принадлежат английскому астроному Дж. Эри. Он впервые в 1827 г. поставил задачу о компенсации aberrаций с помощью дополнительных элементов оптической системы. Этот путь теоретически совершенно правилен; естественно, что по нему пошли исследователи в дальнейшем. Работы Эри сыграли довольно значительную роль для дальнейшего развития теоретической оптики. Основы теоретической оптики заложил в 1840 — 1841 гг. венгерский математик Пецваль. Его работы увенчались крупным успехом уже в 1841 г.: путем математических расчетов он получил первое в истории теоретической оптики частное решение задачи о системе двухкомпонентного фотографического объектива. В том же 1841 г. Ф. Росс в Англии создал аналогичный объектив со строго симметричным расположением линз — простых положительных менисков с диафрагмой между ними. Однако объектив Росса был плодом эмпиризма, а не теории.

В последующие годы Пецваль рассчитал еще несколько весьма удачных (для того времени) объективов. Каждая компонента объектива Пецваля состояла из двух склеенных линз или — в некоторых типах — линз, разделенных воздушным промежутком. О том, насколько плодотворны идеи Пецваля, можно судить хотя бы по тому факту, что объективы его конструкции изготавливаются до настоящего времени (из современных сортов стекол) для спектральной аппаратуры.

В 1855 г. в оптико-механических мастерских К. Штейнгеля (ученика Гаусса, Бесселя и Фраунгофера) начаты расчеты и производство фотографических систем. Математик Зейдель, сотрудничавший со Штейнгелем, вывел большую группу формул для вычисления aberrаций оптических систем. Эти формулы носят его имя и до настоящего времени используются оптиками при расчетах. Некоторая громоздкость формул Зейделя не является помехой в нашу эпоху быстродействующих ЭВМ. Сам Штейнгель по формулам Зейделя рассчитал и создал много фотографических объективов самого разнообразного назначения. Разрабатывавшиеся позже в Англии, Франции и СССР объективы носили довольно явный отпеча-

ток идей Пецваля и Штейнгеля: теоретические работы в этих странах сильно отставали от германской школы.

Карл Цейс, основавший в 1846 г. Иене оптико-механическую мастерскую, привлёк к сотрудничеству известного в то время теоретика в области физики и астрономии Эрнста Аббе. Выбор оказался более чем удачным. Аббе, обладая огромной эрудицией в области физики, начал создавать, в отличие от своих предшественников, общую теорию оптических систем все возрастающей сложности, и самого разнообразного назначения и довольно скоро получил некоторые фундаментальные результаты. Он сформулировал главные требования, соблюдение которых могло привести к

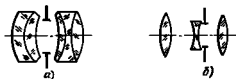


Рис. 3. Оптические схемы объективов: а) анастигмата Рудольфа, б) триплета Тейлора.

успеху при расчете оптической системы: условие синусов и условие ортоскопии. Кроме того, он высказал много плодотворных идей в области изготовления специальных сортов оптического стекла для изготовления рассчитанной им оптики. Результатом усилий Аббе, стеклоара Отто Шютта и Цейса было создание специального завода оптического стекла в 1866 г.

Создание общей теории оптических систем и возможность изготовления оптических стекол с заданными по требованию оптиков-теоретиков свойствами позволило в очень короткий срок перейти к новой фазе в развитии фотографической оптики. Аббе и его сотрудник Рудольф быстро разработали на основе новых стекол серию фотографических объективов. В объективах, рассчитанных Рудольфом, aberrации были скомпенсированы очень хорошо, один из его объективов — "анастигмат Рудольфа", рассчитанный им в 1893 г., не потерял значимости и в настоящее время (рис. 3, а). В этом же 1893 г. Тейлор в Англии на основе теории Зейделя — Аббе создает новый, весьма перспективный тип объектива — так называемый "триплет Тейлора" (рис. 3, б). Идея Тейлора воплощена в чрезвычайно обширной группе объективов, непрерывно дорабатывающихся на основе новых и новых сортов оптических стекол: объективы этого типа широко распространены как штатные объективы для многих конструкций современных фотографических аппаратов. Здесь следует упомянуть разнообразные по назначению объективы серии "Тессар" фирмы Цейса, модификации которых в СССР носят название "Индустар".

В России до Октябрьской революции практически не существовало ни оптико-механической промышленности, ни теоретиков-расчетчиков оптических систем. Однако уже в 1918 г. был создан Государственный Оптический Институт (в настоящее время ГОИ имени С.И. Вавилова). Группа выдающихся ученых во главе с директором ГОИ академиком Д.С. Рождественским — академики С.И. Вавилов, А.А. Лебедев, И.В. Гребенщиков, В.П. Линник, чл.-кор. АН СССР Н.Н. Качалов, А.И. Тудоров-

ский, Д.Д. Максудов и другие – смогла решить не только практические задачи, поставленные страной, но и достигнуть крупнейших успехов мирового значения в области теории оптических систем. ГОИ имеет широкое международное признание и известность.

В 1929 г. возникло Всесоюзное Объединение Оптико-Механической Промышленности (ВООМП). В Ленинграде был создан – впервые в мире – в 1930 г. Ленинградский Институт Точной Механики и Оптики (ЛИТМО). В годы Великой Отечественной войны наша оптико-механическая промышленность смогла обеспечить все нужды фронта в оптических приборах. Следует особо отметить, что ведущее место в развитии аэрофотосъемочного оборудования и вспомогательной аппаратуры для него принадлежит советской оптике благодаря работам М.М. Русинова, создавшего ценную серию специальных аэрофотосъемочных объективов разнообразного назначения на основе совершенно оригинальных идей, нашедших в дальнейшем многочисленные подражания за рубежом. История развития оптики в СССР изобилует такого рода примерами.

§ 4. Оптика панорамных фотокамер

Идея панорамного фотографирования зародилась уже на заре фотографии. Известно, что уже первые фотографы-профессионалы стремились максимально увеличить угловой размер поля изображений хотя бы в одном – горизонтальном – направлении.

Вероятно, первым оптиком, более или менее удовлетворительно решившим задачу панорамного фотографирования, был англичанин Т. Саттон, предложивший в 1859 г. интересную идею панорамного фотографирования с помощью сферической концентрической линзы, имеющей в центре сферическую же полость, заполненную водой. Система Саттона (рис. 4), абсолютно симметричная относительно ее оптического центра, имеет диафрагму в центре шара (Саттон придавал ей форму "бабочки"). Подбором комбинации сорта стекла для линзы и состава воды в качестве материала второй компоненты – внутренней полости системы удалось почти полностью устранить сферическую и хроматическую aberrации. Если отверстие диафрагмы, помещенной в центре шара, достаточно мало, то почти полностью будет устранен и астигматизм. При относительном отверстии 1:15 Саттон получил свободное от aberrаций поле около $120^\circ \times 30^\circ$, что в ту эпоху было огромным достижением. Однако изготовление подобных систем в середине XIX в. было сопряжено с очень большими трудностями технологического характера, поэтому оптики идею Саттона постепенно оставили, считая ее неосуществимой. Лишь Т. Росс пробовал экспериментально развивать идею Саттона, заменив внутреннюю поверхность шара Саттона на цилиндрическую, считая, что вертикальные искажения при небольшой угловой величине поля по вертикали незначительны. Вполне вероятно, что Росс был знаком и с идеями О. Френеля, предложившего линзу, подобную линзе Росса, но на 35 лет ранее. Снимки, полученные с помощью систем Саттона и Росса, к сожалению, не сохранились, хотя о них имеются упоминания в нескольких частных сообщениях.

В конце XIX в. интерес к проблеме панорамного фотографирования после небольшого периода забвения снова возрос. Были теоретически

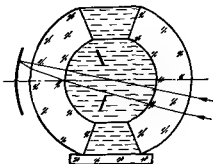


Рис. 4. Оптическая система линзы Саттона

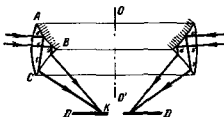


Рис. 5. Оптическая схема торического объектива Манжена.

обнаружены некоторые возможности в этом направлении, основанные на комбинации свойств преломляющих и отражающих поверхностей в одной системе. Наиболее интересна идея французского оптика Манжена, предложившего в 1878 г. для получения панорам протяженностью до 360° , применять торические стеклянные тела с комбинацией преломления и отражения одновременно.

Манжену были известны работы Саттона и Росса, но он отказался от идеи применения полости с жидкостью и решил проблему совершенно оригинально (рис. 5). Любой луч, перпендикулярный оси вращения торического тела OO' , пройдя сферическую поверхность AC , отражается от поверхности AB , имеющей форму параболоида вращения относительно оси OO' . При соответствующем расчете луч далее пересечет сферическую поверхность BC с осью OO' по нормали и придет в точку K на некоторой перпендикулярной оси OO' поверхности DD , которая является фокальной поверхностью этой оптической системы. Изображение поля объектов строится на этой поверхности в виде кольца (рис. 6). При незначительной, порядка $20-30^\circ$, высоте фотографируемой панорамы можно рассчитать теоретически такие параметры поверхностей AC , BC , AB (рис. 5) при заданном сорте стекла, что поле изображений не будет иметь аберраций, кроме, конечно, теоретически неустранимой в данной системе «симметрично-круговой дисторсии» (прерывистые линии на рис. 6), связанной с преобразованием цилиндрического поля объектов в плоское поле изображений, ортогональное оси вращения цилиндра.

Широко поставленные Манженом опыты при участии двух мощных в то время фирм Герца и Цейса не привели к серийному производству подобной оптической системы: не были разработаны технология изготовления и контроль поверхностей, отличающихся от сферических. Не существовало и технологий производства торондальных поверхностей с требуемой точностью. Фирма Герца изготовила несколько экспериментальных систем Манжена, получивших название «периграф»; известны фотоснимки, полученные такими системами.

В 1892 г. француз Моёссар нашел интересное и чрезвычайно простое решение задачи панорамного фотографирования с помощью известных уже в то время высококачественных широкоугольных объективов (рис. 7).

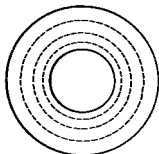


Рис. 6. Вид поля изображений системы Манжеса с изолиниями дисторсии (штриховые линии).

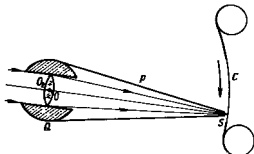


Рис. 7. Оптическая схема системы Моёссара.

Эта система, названная Моёссаром "цилиндрографом", состоит из объектива O_2 , вставленного во вращающийся цилиндр Q с осью вращения, перпендикулярной плоскости чертежа и проходящей через точку O , совпадающую с задней главной точкой объектива. Этот цилиндр Моёссар называл "ротором" (в дальнейшем мы будем употреблять этот термин). С последним жестко связана светоограничительная коробка P , на конце которой, в непосредственной близости от фокальной поверхности камеры, расположена щель S , перпендикулярная плоскости чертежа. Фотопленка C располагается на цилиндрической поверхности, имеющей радиус, равный главному фокусному расстоянию объектива. При вращении ротора с конусом на поверхности фотопленки непрерывно сканируется все поле изображений объектов, находящихся в направлении оптической оси объектива. Используя такую систему, можно получить панорамную развертку до $120-150^\circ$, но не более из-за ограничений, связанных с габаритами объектива. Впрочем, это ограничение можно преодолеть, если вынести объектив из самой камеры, как показано на рис. 8, а и 8, б. В обоих вариантах фокусное расстояние должно быть равно радиусу цилиндрической поверхности, на которой расположена фотопленка C , следовательно, $f_0 = O_2C$. Вращение системы объектива O_2 и зеркал D_1 и D_2 происходит относительно оси OO' , щель SS' в данном варианте вертикальна и жестко связана с системой, включающей объектив и зеркала. Такая камера называется "перископическим цилиндрическим графом".

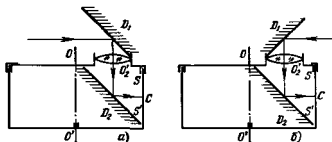


Рис. 8. Оптические системы Моёссара для получения панорам протяженностью 360° .

Камеры подобного типа были осуществлены в многочисленных вариантах и успешно применялись для получения панорамных снимков в конце XIX и начале XX вв. не только во Франции, но и в других странах под различными наименованиями. С помощью камер Моёссара производилось фотографирование электрических разрядов в лабораториях, молний, панорам ландшафта, архитектурных сооружений, облаков, заревых явлений и т.п.

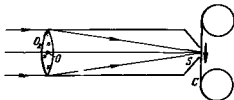


Рис. 9. Оптическая схема системы Дамуазо.

Несколько позже, в 1893 г. во Франции практически подобную же идею панорамного фотографирования реализовал со значительными усовершенствованиями Дамуазо. Его панорамная камера, под названием "циклограф", отличается от камеры Моёссара тем, что фотопленка S в ней подвижна (рис. 9). Это движение фотопленки вслед за щелью должно осуществляться с такой скоростью, чтобы компенсировать смещение поля изображений при вращении камеры в процессе сканирования. Таким образом, механизм вращения всей камеры должен быть жестко связан с механизмом перемещения фотопленки, чтобы изображение за плоскостью щели S при сканировании на подвижную фотопленку получилось неразрывным. Осуществить жесткость связи системы, механизмов на практике оказалось нелегким делом, несмотря на кажущуюся техническую простоту идеи. Камеры Дамуазо, тем не менее, нашли широкое применение в аэрофотографии под названием "щелевых". Габариты камеры Дамуазо значительно меньше габаритов камеры Моёссара. Преобразование пространства объектов в пространство изображений происходит в камере Дамуазо со значительной потерей информации за счет искажений масштаба вдоль направления сканирования по причинам, указанным выше. Несомненным преимуществом системы Дамуазо является возможность применения в последней объективов с любыми параметрами. Она не требует перископического преобразования хода лучей при панорамном фотографировании протяженностью до 360° .

В начале XX в. оптики вернулись к идее торического объектива. А. Глейхен в 1902 г. предложил один из вариантов зеркального торического объектива, не потерявшего значения и в настоящее время. Пусть вогнутая торическая поверхность (рис. 10) образована дугой окружности BC и имеет ось симметрии AA' . Если торическая поверхность зеркальна и угол падения на нее луча $YK \perp AA'$ равен i , то с помощью такого зеркального тела можно получить изображение вдоль всего горизонта, например на плоскости DD , перпендикулярной оси AA' .

Такая система обладает значительным астигматизмом. Меридиональные лучи соберутся ею в точке P_m , а сагиттальные — в точке P_s . Теория

отражения дает следующие формулы для определения расстояний точек P_m и P_s от точки P . Для сагиттального сечения

$$KP_s = f'_s = \frac{r'}{2 \cos i},$$

где r' — радиус кривизны в сагиттальном сечении (радиус окружности, проходящей через точки K и K' в плоскости, перпендикулярной оси AA'). Для меридионального сечения

$$KP_m = f'_m = \frac{r \cos i}{2},$$

где r — радиус кривизны дуги BC . Условием отсутствия астигматизма является равенство $f'_m = f'_s$, следовательно, выполнение соотношения

$$\frac{r}{r'} = \frac{1}{\cos^2 i},$$

что практически невозможно для всех углов i .

Задача полного устранения астигматизма чрезвычайно сложна — настолько, что и в настоящее время теоретическая оптика может дать лишь ее приближенное решение для любой относительно простой системы.

Кроме того, поскольку в объективе Глейхена поверхность, ответственная за формирование изображения, единственная, сферическая аберрация, кома и отклонение от закона синусов Аббе не могут быть устранены в такой степени, чтобы система стала пригодной для получения изображений высокого качества. Поэтому к двадцатым годам XX в. остались две перспективные идеи панорамного фотографирования: Мойссара и Дамуазо.

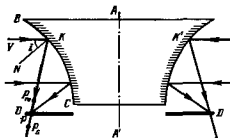


Рис. 10. Оптическая схема системы Глейхена.

Все остальные идеи были признаны оптиками бесперспективными. Возможно, что это заключение и не должно быть столь категоричным — ведь теоретическая оптика не стоит на месте и современные заключения о пригодности или непригодности тех или иных систем могут быть опровергнуты. Вероятно, оптики будут вновь и вновь обращаться к временно забытым идеям Саттона, Росса, Манжена, Глейхена и другим на базе новых сортов стекол и новых расчетных методов, о которых оптики начала XX в. не могли и мечтать. Тем более, что успешно разрабатываются новые методы изготовления асферических поверхностей и способы их эффективного

контроля в процессе изготовления с применением лазерной техники и методов голографии.

У панорамного метода фотографирования имеется один принципиальный недостаток, пожалуй, в настоящее время неустранимый. Он заключается в следующем. Камеры Дамуазо и Моёссара сканируют изображение не только в пространстве, но и во времени: изображения объектов на различных участках панорамы получаются в разные моменты времени. Если при съемке технических сооружений или ландшафта этот недостаток не играет особой роли, то при съемке быстро изменяющихся объектов теряется много информации по полю изображений. Многочисленные попытки устранить этот недостаток пока не привели к существенным результатам. Вероятно, по этой причине оптики при решении задач, связанных с конструированием аппаратуры для аэрофотосъемки, пошли по несколько иному пути решения задачи получения панорамных снимков.

В 20-е годы XX в. Ашенбреннер в Германии разработал по идее своего соотечественника Шеймпфлюга так называемую "мозаичную" панорамную систему — комплекс, состоящий из девяти отдельных камер с одинаковыми оптическими параметрами, для получения снимка на одном негативе (рис. 11). Один из объективов проектирует изображение в центральной части негатива-мозаики, остальные восемь проектируют изображение поля объектов на эту же негативку с помощью системы отклоняющих призм P (поглощение света в призмах очень велико, поэтому центральный объектив значительно задиафрагмирован). Схема мозаичного снимка приведена на рис. 12. Максимальный поперечник поля изображений достигал в серийных экземплярах камер до 148° . Съемка велась на пластинках размером 180×180 мм.

Ввиду больших трудностей, связанных с юстировкой комплекса, его возможных рассогласований в отдельных узлах при эксплуатации, а также из-за большого светопоглощения в призмах, Ашенбреннер применял в этом комплексе только короткофокусные объективы с фокусным расстоянием около 53,5 мм и рабочим полем порядка 50° . Относительное отверстие было очень малым — $1 : 6,3$, совершенно недостаточным для решения задач аэрофотосъемки в начале XX в., когда фотографические материалы обладали низкой чувствительностью. Фирма Штейнгеля в Германии выпустила в 1928 г. небольшую серию таких комплексов, однако широкого

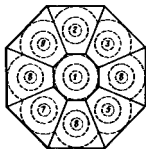
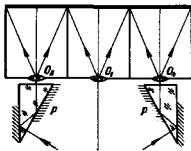
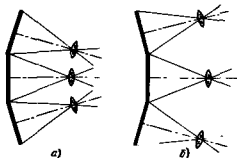


Рис. 11. Оптическая схема мозаичного комплекса Ашенбреннера.

Рис. 12. Схема снимка, полученного с помощью мозаичного комплекса Ашенбреннера, с изолиниями дисторсии (прерывистые линии).

Рис. 13. Оптическая схема мозаичного всеорного комплекса: а) объективами внутрь, б) объективами наружу.



распространения они не получили. Попытки применения этих панорамных систем для астрономических исследований (фотографирования метеоров) к успеху также не привели: и диаметр отверстия объективов, и светосила, и малый масштаб изображений заставили астрономов отказаться от подобных инструментов.

Комплексы типа Ашенбреннера не могут иметь и астрометрического применения: практически невозможно создать совершенно одинаковые фотографические объективы, поэтому учет дисторсии, например, на стыках полей у такого комплекса весьма затруднен. На рис. 12 изображены изолинии дисторсии для идеального случая, когда последние — окружности, концентричные оптическому центру поля каждой камеры. На практике, как известно, эти изолинии не являются точными окружностями, что усложняет задачу учета дисторсии.

Семикамерный комплекс подобного рода был изготовлен в Англии по разработке фирмы Барр и Струд в 1937 г., он не имел никаких существенных отличий от комплекса Ашенбреннера, за исключением числа фотокамер. Поле этого комплекса имело 120° в поперечнике, объективы были короткофокусными по причинам, указанным выше. Несколько экземпляров таких комплексов было изготовлено и с очень сомнительным успехом применялось в аэрофотосъемке. В 1940—1941 гг. интерес к таким комплексам упал, так как появились широкоугольные объективы с полями до 100 и более градусов в поперечнике. Современные метеорные патрули-комплексы из нескольких фотокамер отличаются от комплекса Ашенбреннера тем, что в них камеры фиксируют изображение большой области небосвода по отдельности не на одну общую фотопластинку или фотопленку, поэтому могут быть использованы объективы со значительной светосилой.

Стоит упомянуть еще об одном типе камер — "мозаичных всеорных" комплексах, разработанных, как и комплекс Ашенбреннера, в 20-е годы XX в. (рис. 13). Оптические оси всех камер расположены в одной плоскости, которая называется "всеорной". На рис. 13 показаны два варианта всеорных камер: "объективами внутрь" и "объективами наружу". Принцип их один и тот же, но вариант "б" позволяет фотографировать поле протяженностью до 360° , что невозможно при варианте "а". На границах отдельных кадров имеет место то же самое условие несовпадения изолиний дисторсии, что и в комплексе Ашенбреннера. Всеорная панорамная камера нашла себе применение в астрономии для патрулирования зон эклиптики или Млечного Пути с целью раннего обнаружения новых обь-

ектов, а также и при фотографировании некоторых протяженных объектов.

В 30-е годы XX в. начались усиленные разработки широкоугольных объективов для аэрофотографии. Первой, до некоторой степени удачной, попыткой в этом направлении можно считать расчет объектива с полем около 180° , принадлежащий Гиллу. Схема этого объектива приведена на рис. 14. При очень малом относительном отверстии порядка $1:22$, объектив обладал непомерно большой дисторсией на краях поля, что полностью исключало возможность его астрономического применения. Некоторое время этот объектив, широко разрекламированный, изготавлился для фотографирования облаков. Уже в 1934 г. его перестали выпускать из-за отсутствия спроса: качество снимков оставляло желать много лучшего. Столь же неудачен был объектив "Плейон" фирмы Цейс с несколько меньшим углом поля — 130° и относительным отверстием $1:8$.

Удачное решение задачи о создании сверхширокоугольного объектива было найдено Д.С. Волосовым, рассчитавшим систему с фокусным расстоянием 100 мм, углом поля 120° и довольно большим относительным отверстием $1:3$. Этот объектив, названный "Сфероном", изображен на рис. 15. Поле изображений объектива является сферическим, что и определило узкий круг задач, решаемых с его помощью. Являясь по типу системой концентрической, "Сфероном" относится к системам, идея которых была выдвинута Саттоном, но отличается от объектива Саттона тем, что не имеет сферической концентрической компоненты внутри, хотя и требует применения иммерсионной жидкости для заполнения узкого зазора между линзами (OO' на рис. 15). Автор разработки совершенно справедливо полагает, что сферичность поля не является недостатком, ибо с помощью волоконной оптики этот недостаток может быть преодолен.

Большую группу сверхширокоугольных объективов создал, как об этом говорилось выше, М.М. Русинов со своими сотрудниками. Его объективы — "Руссары" — обладают полями до 130° и более, имеют хорошие метрологические характеристики. Один из таких объективов, "Руссар-29", показан на рис. 16. Это — почти симметричная система, она нашла не только широкое применение, но и массу подражаний в многочисленных разработках за рубежом. В астрономических исследованиях подобные системы имеют весьма ограниченное применение по целому ряду причин.

В период проведения Международного Геофизического года 1957–1958 гг. (МГГ) возникла необходимость в проведении фотографических

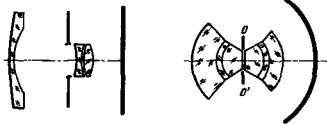


Рис. 14. Оптическая схема широкоугольного объектива Гилла.

Рис. 15. Оптическая схема широкоугольного объектива "Сфероном" Д.С. Волосова.

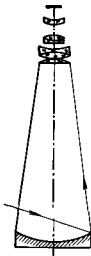
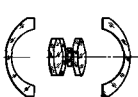


Рис. 16. Оптическая схема широкоугольного объектива "Руссар-29" М.М. Русинова.

Рис. 17. Оптическая схема системы Хеней-Гринштейна.

Рис. 18. Оптическая схема системы А.И. Лебединского - Г.Г. Ленгауэра.

работ с камерами, имеющими поле до 180° . Из созданных оптических систем заслуживают рассмотрения два типа сверхширокоугольных камер, довольно близких по основной идее воплощения. Это камера Хеней - Гринштейна, разработанная в США, и камера А.И. Лебединского - Г.Г. Ленгауэра (СССР).

Идея, легшая в основу разработки обоих типов камер, довольно проста и была давно известна оптикам. В зеркале со сферической поверхностью, при некоторой кривизне, может быть отражена целая полусфера (это справедливо как для выпуклого, так и для вогнутого зеркала). Такое отражение можно сфотографировать с некоторого расстояния при помощи короткофокусной камеры, наведенной "на бесконечность". Опыты подобного рода производились с начала XX в., известны снимки, полученные таким путем.

В схеме Хеней - Гринштейна зеркало располагается оптической осью в зенит независимо от того, выпуклое оно или вогнутое. Фотокамера расположена на трех длинных штангах на такой высоте, чтобы максимально скомпенсировать aberrации всего комплекса "зеркало - камера". Схема комплекса приведена на рис. 17. Линейное поле таких комплексов очень мало, всего 10-20 мм. Зато угловое, эквивалентное, поле достигает 180° . Характеристики такого комплекса исключают сколько-нибудь эффективное применение их для астрометрических или астрофизических исследований.

Система Лебединского - Ленгауэра несколько отлична от системы Хеней - Гринштейна, она скорее является некоторой сверхширокоугольной разновидностью системы Кассегрена. Зеркало в этой системе вогнутое, обращено вогнутостью в зенит. Вторичное зеркало расположено на трех опорах над главным (рис. 18), фотокамера расположена под главным зеркалом. Дисторсия и астигматизм этой камеры очень велики, как и у камеры Хеней - Гринштейна.

Существенным недостатком обоих типов камер является низкая пронающая сила и низкие метрологические характеристики, что ограничи-

вает область применения этих камер очень узким кругом решаемых задач: в основном они применяются для фотографирования болидов, облаков, иногда — для фотографирования полярных сияний или серебристых облаков, т.е. в тех случаях, когда не требуется попутно решать астрометрические задачи. Эти камеры получили название "камер всего неба", так как с их помощью действительно фотографируется вся видимая полусфера неба.

Прогресс в развитии волоконной оптики, достигнутый в последние годы, позволяет надеяться на то, что многие проблемы теоретической оптики, связанные с расчетом аберраций и их устранением, будут успешно решены. Уже первые успехи в этом направлении являются весьма обнадеживающими, хотя и связаны со значительными трудностями технологического характера и высокой стоимостью волоконных корригирующих элементов, а также с трудностями получения таких элементов с апертурой, большей 50—60 мм.

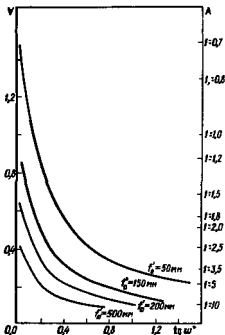
Быстро развивается и теория сверхширокоугольных объективов — увеличивается их светосила и улучшаются метрологические характеристики; правда, очень медленно растут значения угловых полей, улучшается светораспределение по полю изображений. Все шире и шире вводятся элементы, имеющие несферические поверхности: методика получения последних, а также методы контроля формы поверхности развиваются быстрыми темпами. Разрабатывается и теория офсетных оптических систем: их некоторые преимущества до недавнего времени незаслуженно были обойдены вниманием оптиков. Возможно, что в самом близком будущем появятся и принципиально новые сверхширокоугольные оптические системы на базе нелинейной оптики.

§ 5. Выбор параметров панорамной фотокамеры

По особенностям своей конструкции панорамная камера не может иметь объектив с большим фокусным расстоянием, так как резко возрастают габариты и масса и, как следствие первых двух условий, деформации и связанные с ними ошибки метрологического характера. Отсюда следует, что выбор параметров панорамного комплекса, состоящего в основном из фотокамеры и гйда, имеет важное значение. Судя по возможному кругу задач, которые можно в принципе решать с помощью панорамной фотографии, наиболее вероятным верхним пределом фокусного расстояния объектива можно считать чисто условно 1000 мм. Нижний предел определяется в значительной степени соображениями, зависящими от характера решаемой задачи или требуемой прадельной (минимальной) точности результатов фотографирования. Штатные (серийные) объективы могут иметь фокусные расстояния всего каких-нибудь 10—15 мм, но некоторые задачи астрономии могут решаться и с помощью такой короткофокусной оптики.

Следовательно, выбор параметров оптики возможен тогда, когда поставлена конкретная задача исследования, известен объект наблюдения или хотя бы класс таких объектов. Но на практике не всегда можно получить в свое распоряжение необходимую оптику, иногда она просто не существует. Ограничения параметров оптических систем, имеющие теоре-

Рис. 19. Диаграмма возможного сочетания оптических характеристик фотографических объективов по Д.С. Волосову.



Д.С. Волосов приводит довольно удачную, с нашей точки зрения, диаграмму возможного сочетания оптических характеристик фотографических объективов: фокусного расстояния f' , относительного отверстия A , относительного фокуса V и половины углового поперечника поля зрения w° (рис. 19). Известные конструкции самых разнообразных советских и зарубежных объективов имеют такие параметры, что они "ложатся" на приведенные кривые достаточно удовлетворительно. Для почти полутора сотен объективов сопоставление их параметров с данной диаграммой показало хорошую сходимость в пределах порядка 5–10%. Конечно, существуют сверхширокоугольные объективы с коррегирующими оптическими элементами, которые на этой диаграмме не находят места, но они представляют собой просто исключение из полученной эмпирическим путем закономерности.

Волосов строит свою диаграмму на основе полученной им закономерности вида

$$C_m = 0,1 A \lg w^\circ \sqrt{f'}$$

По его мнению, а также по исследованию других авторов, подобная зависимость, где C_m в пределах 0,22–0,24 есть постоянная величина для очень большой группы объективов, подтверждается вполне удовлетворительно. Постоянная C_m — функция очень многих параметров: числа линз, светового уравнения поля, разрешающей способности и т.д.

Для удобства пользования терминологией в дальнейшем примем за основу классификацию объективов по их параметрам, предложенную Волосовым:

1. Светосильные объективы, $A \geq 1 : 2,8$.

2. Широкоугольные объективы, $2\omega^\circ > 60^\circ$.
3. Длиннофокусные объективы, $f'_0 > 6l_0$
(l_0 — линейная полуширина поля).
4. Нормальные объективы.

Последние объективы часто называют универсальными; их характеристики одновременно не достигают значений, указанных выше. Эта классификация не имеет под собой никакой теоретической базы — она абсолютно условна, но ее применение на практике весьма удобно при сопоставлении параметров объективов, хотя различные авторы принимают несколько различные числовые характеристики. Тем важнее придать этим характеристикам некоторое определенное количественное содержание. Это одна из причин, побудивших автора придерживаться классификации, предложенной Вольфовым.

Допустим, что отсутствует необходимая для решения поставленной задачи оптика и приходится использовать ту, которая в силу каких-то обстоятельств попала в наше распоряжение. Если она, по нашему мнению, может выполнять ограниченные функции при исследовании, стоит детально рассмотреть ее оптические характеристики, изучить их тем или иным путем и сделать окончательные выводы о пригодности системы.

Важной метрологической характеристикой считается величина кружка рассеяния изображения точечного объекта в центре поля и на его периферии. Примем за идеал диаметр кружка рассеяния, равный 0,050 мм (что вполне допустимо) и сравним характеристики трех, довольно близких по своим параметрам, объективов: "Индустар-52", "Уран-16" и "Телемар-7". Число отдельных оптических компонент у них соответственно три, пять и четыре. На рис. 20 приведены результаты исследования зависимости величины кружка рассеяния от звездной величины m_{pg} объектов точечного характера. Наилучшими качествами, несмотря на довольно скромные значения оптических параметров, обладает объектив "Индустар-52": он создает изображения наименьшего поперечника по сравнению с другими. Однако уже в области девятой звездной величины объектов все три системы сравнительно мало отличаются друг от друга.

При фотографировании же протяженных (диффузных) объектов "Уран-16", судя по результатам специальных исследований, несколько предпочтительнее двух других, его светосила выше и в пределах поля $2\omega^\circ \leq 10 - 15^\circ$ световое уравнивание его еще незначительно. Объектив с успехом может применяться для выполнения работ, связанных с фотографической фотометрией. Фокусные расстояния объективов "Индустар-52", "Уран-16" и "Телемар-7" соответственно составляют 500, 750, 1000 мм при относительных отверстиях 1:5,0; 1:3,5; 1:7,0. Поэтому на первый взгляд для решения астрономических задач определенного класса "Телемар-7" лучше, но он обладает некоторыми отрицательными качествами: у него сильно падает разрешающая способность от центра поля к краям последнего и довольно велики термооптические аберрации. В процессе решения астрометрических задач может оказаться, что более короткофокусный "Индустар-52" даст лучшие конечные результаты.

Последнее обстоятельство и послужило причиной того, что в качестве базового в данной работе нами принят объектив "Индустар-52"; его ха-

характеристики позволяют отнести этот объектив к "нормальным" по классификации Волосова.

Громадное разнообразие объективов по их параметрам не позволяет построить единую теорию, описывающую возможности оптических систем. Могут быть созданы, например, два совершенно одинаковых по геометрическим параметрам объектива, но из разных сортов стекол. Тогда, даже если оптические схемы их одинаковы, они могут иметь совершенно различные коэффициенты пропускания в разных областях спектра и различные аберрационные характеристики, не говоря уже о их метеорологических особенностях. Естественно, что попытки многих исследователей вывести некоторые постоянные, зависящие от параметров оптических систем, встречаются с очень серьезными затруднениями.

На практике наблюдатель предпочитает получить предельные рабочие характеристики для имеющегося в его распоряжении объектива сам, путем натурных исследований с использованием различных фотоматериалов и в различных метеорологических условиях (при разных температурах окружающей среды и при различных оптических характеристиках атмосферы). Важное значение имеет тот факт, что наблюдатель в своей работе должен быть полностью уверен в том, что он получит необходимые ему данные в процессе фотографирования, особенно в тех случаях, когда процесс фотографирования по какой-либо причине повторить уже невозможно. В астрономической практике такие обстоятельства возможны весьма часто.

Первое, что чаще всего определяет наше отношение к вопросу о пригодности объектива для решения поставленной задачи, это проникающая сила. Эта характеристика исследовалась очень многими наблюдателями. В частности, И.С. Боуэн теоретически наиболее полно обосновал формулы для определения проникающей силы фотографических систем произвольных параметров. Формула для определения проникающей силы камеры получена Боуэном в виде $m_{\max} = +18^m,5 + 0,69 \lg f'_0$ и довольно хорошо применима в случае объективов с диаметром выше 300–400 мм и фокусным расстоянием 3 – 4 м. Как показали эксперименты, для короткофокусных систем она дает очень завышенное значение проникающей си-

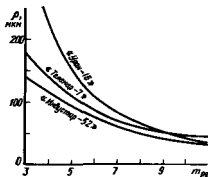
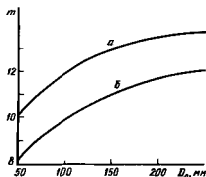


Рис. 20. Зависимость диаметра кружка рассеяния от звездной величины для трех объективов.

Рис. 21. Зависимость фотографической проникающей силы от диаметра объектива. a — теоретическая, предельная, b — экспериментальная.



лы — такое, которое достижимо только при соблюдении массы ограничивающих условий: идеальной оптики системы, отсутствия внешних помех, фотографировании на высокочувствительной фотопленке с высоким разрешением и т.п. Рис. 21 дает наглядное представление о расхождениях для нескольких объективов между теоретическими данными и результатами натурных исследований, известными из литературных источников. Расхождение равно почти двум звездным величинам, что требует уменьшить постоянную в формуле Боуэна минимум на две единицы. В результате формула Боуэна получит вид

$$m_{\max} = +16^m,5 + 0^m,7 \lg f'_0.$$

Приведенная формула не отражает зависимости проникающей силы от величины эффективной экспозиции для случая уверенного обнаружения изображения нестатистическими методами. Для этого случая зависимость можно выразить в виде

$$m_{\max} = 2^m,11 \lg T_{\text{eff}}^2 + 8^m,3.$$

Предельная величина звезд, полученная по этой формуле, отличается от практически достижимой примерно на $\pm 0^m,5$, что и ограничивает до некоторой степени применение формулы для расчетов. Добавим, что время экспозиции выше 30 минут едва ли дает выигрыш в проникающей силе из-за резкого роста вуали, затрудняющей измерения.

Зависимость проникающей силы от диаметра объектива D_0 иллюстрируется рис. 22. Кривые $V=7$ и $V=1,5$ ограничивают соответственно нижний и верхний пределы достижимых звездных величин по данным некоторых источников для оптических систем с различным относительным фокусом V . О.А. Мельниковым с сотрудниками теоретически получены подобные же значения, но, как и у Боуэна, сильно завышенные из-за пренебрежения практическими особенностями оптических систем и сопутствующими условиями фотографирования. Завышение проникающей силы составляет почти одну звездную величину, и его следовало ожидать.

Интересен вопрос о зависимости проникающей силы системы при наблюдении искусственных спутников Земли. В общем виде угловую скорость ИСЗ над горизонтом можно представить в таком виде:

$$\omega_T = F(h, H),$$

где h — угловая высота ИСЗ над горизонтом, а H — высота над земной поверхностью. Рассмотрим простейший случай, когда орбита ИСЗ круговая

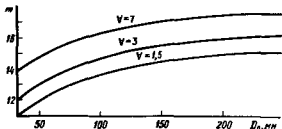


Рис. 22. Зависимость фотографической проникающей силы от диаметра объектива при различных V .

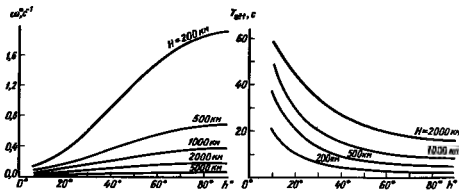


Рис. 23. Угловая скорость ИСЗ в функции от h для различных значений H для случая проходящих через зенит круговых орбит.

Рис. 24. Зависимость эффективного времени экспозиции при панорамном щелевом фотографировании от угловой высоты ИСЗ для случая проходящих через зенит круговых орбит.

и он проходит над горизонтом через зенит наблюдателя. Тогда искомая зависимость может быть иллюстрирована формулой

$$\omega_T = \frac{360^\circ \cdot R_0}{2\pi H} \sqrt{\frac{9,81 \sin^3 h}{R_0 + H}}.$$

На рис. 23 приведены кривые, характеризующие эту зависимость для пяти различных высот ИСЗ над Землей. Естественно, когда эксцентриситет орбиты ИСЗ не равен нулю и он не пролетает через зенит наблюдателя, изменение угловой скорости будет иметь несколько иной, более сложный, характер. Соответствующие расчеты могут быть произведены с учетом параметров орбиты ИСЗ, если наблюдателю известно свое положение на земной поверхности.

Примем ширину щели панорамной камеры порядка 10 мм. Для ИСЗ, имеющих угловую скорость не более 1°с^{-1} , такая ширина щели обеспечит достаточное число опорных звезд на поле панорамы. Результаты расчета эффективного времени экспозиции для четырех ИСЗ с высотами H от 200 до 2000 км приведены на рис. 24. При расчетах здесь также принято, что орбита ИСЗ круговая и он проходит через зенит наблюдателя. Малые значения времени экспозиции для низких ИСЗ не должны вызывать сомнений в возможности их фотографирования, так как их яркость в общем случае несколько выше, чем более далеких. В соответствии с теорией эффективное время экспозиции в зените минимально.

Фотографирование ИСЗ, низко расположенных над горизонтом, обнаруживает интересный эффект (но довольно просто, впрочем, объясняемый теорией): для низких ИСЗ, с высотой порядка 200–500 км, проникающая сила камеры в отношении звезд вначале несколько возрастает, а затем падает по мере приближения объекта к зениту (рис. 25). Это изменение проникающей силы может иметь важное значение, если учесть, что у горизонта очень быстро растет атмосферное поглощение. Максимально наблюдавшееся

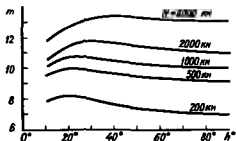


Рис. 25. Зависимость проникающей силы панорамной щелевой камеры от угловой высоты для звезд.

увеличение проникающей силы составляло около 0,5 звездной величины, что не так уж и мало.

При ширине щели, отличной от указанной выше, эффективная экспозиция для ИСЗ может быть найдена с достаточно хорошим приближением по формуле

$$T_{\text{eff}} = \frac{2\beta_0}{\omega_\tau} = \frac{2I_0}{f_0' \omega_\tau},$$

где β_0 — угловая полуширина щели панорамного снимка.

Рассмотрим вопрос о светораспределении по полю изображений панорамной фотокамеры. Идеальный закон светораспределения по полю изображений фотографической системы может быть представлен в таком виде:

$$E_w = E_0 \cos^4 w^\circ.$$

Совершенно нерегулярным светораспределением обладают чаще всего многолинзовые оптические системы, нередко используемые при астрономических исследованиях. Особенно сильно эффект проявляется у широкоугольных систем, для которых закон светораспределения выражается в виде

$$E_w = E_0 \cos^n w^\circ,$$

где n отличается от четырех в ту или иную сторону иногда на значительную величину.

При покадровом фотографировании изолинии освещенности будут иметь вид концентрических окружностей относительно оптического центра снимка, если нет никаких факторов, нарушающих указанную закономерность. При панорамном фотографировании изолинии освещенности, очевидно, будут являться прямыми, параллельными развертке панорамы, причем они будут располагаться на различных расстояниях относительно центральной линии в верхней и нижней частях панорамы, что создает некоторые затруднения при учете светораспределения по полю панорамы, особенно в случае астрофизических исследований.

Поскольку световое поле при покадровой съемке двумерно, а при панорамной (при малой ширине щели) — одномерно, то потери информации для последней значительно меньше, чем для первой. Достигаемый выигрыш может быть определен для конкретной оптической системы только путем ее исследования.

Совершенно особую роль играет виньетирование, имеющее совершенно индивидуальный характер для различных оптических систем. На практике

исследователь не старается разделить влияние светораспределения (часто последнее характеризуют понятием светового уравнения поля) и виньетирования, а изучает их совместно путем экспериментирования. Наиболее простым способом изучения светораспределения можно считать способ, основанный на фотографировании звездного неба в околосенитной области. Фотометрирование звезд снимка и сравнение результатов измерений с каталожными значениями блеска звезд позволяет достаточно хорошо установить характер светораспределения по полю камеры.

При фотографировании протяженных (диффузных) объектов можно до некоторой степени устранить вредное влияние светового уравнения поля, но только в случае панорамного фотографирования, путем, например, увеличения ширины щели от ее центра к краям по закону, который можно получить путем экспериментального изучения светораспределения. Конечно, при этом значительно ухудшаются метрологические характеристики поля к краям панорамы — верхнему и нижнему.

В заключение параграфа о выборе параметров панорамной фотокамеры рассмотрим применение метода аподизации входного отверстия оптической системы с целью частичного уменьшения влияния aberrаций объектива.

Источником ошибок при определении положений объектов являются aberrации оптических систем такие, как сферическая aberrация, кома, астигматизм — они вносят наибольший вклад в величину ошибок измерений негативов. Несколько меньшее значение имеют световое уравнение поля, виньетирование и хроматизм положения. В случае покадрового фотографирования основным методом борьбы с aberrациями является диафрагмирование, при котором значительно уменьшается световой поток, входящий в оптическую систему и, следовательно, уменьшается проникающая сила системы.

Поскольку одно из главных различий панорамного и покадрового методов фотографирования состоит в том, что в первом случае изолинии aberrаций суть прямые, параллельные направлению сканирования панорамы, а во втором — окружности, концентричные оптическому центру снимка, возникает вопрос: нельзя ли использовать данное различие для того, чтобы каким-либо путем снизить влияние aberrаций при панорамном фотографировании? Оказывается, это возможно, если применить метод аподизации входного отверстия оптической системы, т.е. использовать фигурные диафрагмы. Теория аподизации связывает распределение светового потока в дифракционном изображении точки в поле изображений с формой или иными особенностями сечения светового потока, входящего в оптическую систему, а также с интенсивностью отдельных частей этого потока.

Вообще говоря, форма аподизирующего отверстия диафрагмы может быть любой, но расчет aberrаций в этом случае значительно усложняется. Исследование вопроса показало, что наимыгоднейшей формой контура является эллиптическая, при которой наименее ухудшается дифракционная структура изображения точки. Коэффициентом аподизации называется в этом случае отношение полуосей эллипса диафрагмы b/a . Эта величина характеризует уменьшение влияния aberrаций.

Экспериментальная проверка полученных выводов подтвердила их достаточно хорошо на примере исследования эффекта аподизации входного отверстия базового объектива. Расхождения между теорией и результатами

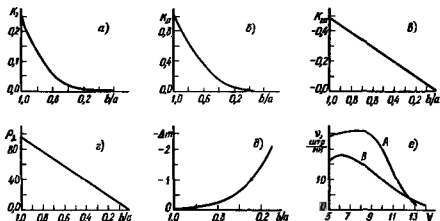


Рис. 26. Эффект аподизации входного отверстия базового объектива эллиптическим контуром в зависимости от коэффициента аподизации b/a . а) Коэффициент сферической aberrации K_I ; б) коэффициент комы K_{II} ; в) коэффициент астигматизма K_{III} ; г) изменение коэффициента хроматизма положения ρ_λ ; д) потери проникающей силы Δm ; е) изменение разрешающей способности в зависимости от V в центре поля A и на расстоянии $7-8^\circ$ от центра поля B .

эксперимента малы. На рис. 26 эти результаты представлены графически достаточно убедительно.

Наилучший эффект имеет место в отношении комы и астигматизма, как и следует из теории аподизации. На характер дисторсии, но понятным причинам, аподизация практически никакого влияния не оказывает. Несколько уменьшается хроматизм положения. В качестве отрицательного эффекта, сопровождающего процесс аподизации, можно называть изменение формы кружка рассеяния — он приобретает форму эллипса. Несколько изменяется характер виньетирования и светового уравнения поля. Поскольку за метрологические характеристики поля изображений несут ответственность в основном кома, астигматизм и сферическая aberrация, можно полагать, что в целом эффект аподизации играет положительную роль.

Вероятно, метод аподизации следует применять в тех случаях, когда допустима некоторая потеря проникающей силы, потребуется получить поле изображений более высокого качества в отношении метрологических характеристик, чем оно возможно при данной оптической системе. Указанный прием, очевидно, не имеет никакого смысла при фотографировании диффузных объектов.

§ 6. Выбор параметров гйда к панорамной фотокамере

Многолетний опыт работы с малыми фотографическими камерами, снабженными гидирующими приспособлениями, позволяет с некоторой степенью точности согласовать оптические характеристики гйда в зависимости от оптических данных объектива камеры. Гид характеризуется величиной визуальной проникающей силы, полем зрения, увеличением и разрешающей способностью, которые и подбираются в соответствии с парамет-

рами камеры и с учетом класса наблюдаемых объектов. Наблюдение протяженных объектов требует широкоугольного гйда; изолированных малых по угловым размерам объектов — высокой разрешающей способности и большого увеличения; в случае слабых объектов — высокой проникающей силы. Естественно, в одной оптической системе или невозможно, или весьма затруднительно объединить все необходимые требования, поэтому гйд до некоторой степени индивидуален.

Заметную отрицательную роль играет то обстоятельство, что поле зрения окуляра гйда, как правило, неоднородно по своим характеристикам: проникающая сила и разрешающая способность падают по некоторому, индивидуальному для данной системы окуляра, закону от центра поля к его краям. У некоторых окуляров разрешающая способность падает к краям в два раза, а проникающая сила — на одну или две звездные величины.

Д.Д. Максutow и И.С. Астапович убедительно показали, что для движущихся объектов на черном фоне визуальная проникающая сила телескопа более низка, чем в случае неподвижных объектов такого же блеска на том же фоне. Это обстоятельство необходимо учитывать, выбирая оптическую систему гйда для решения конкретных задач.

На основании данных, полученных из разнообразных источников, можно представить зависимость проникающей силы визуального телескопа (гйда) от диаметра объектива при условии, что последний не превышает 200—300 мм. Длиннофокусные визуальные системы с более крупными объективами позволяют применять значительные увеличения, а последние существенно влияют на проникающую силу телескопа. На рис. 27 показана зависимость проникающей силы гйда от диаметра объектива.

Приводимые в различных источниках формулы для определения интересующей нас величины дают при одинаковых по оптическим параметрам телескопах заметно отличающиеся в количественном отношении результаты. Иначе и быть не может, так как учесть все влияющие на величину проникающей силы факторы, как и в случае фотографической системы, невозможно. Например, расхождение данных рис. 27 подчас составляет, вопреки теории, около двух звездных величин (в меньшую сторону). Явно завышенные значения проникающей силы гйда иногда приводят к тому, что становится невозможным выполнение каких-либо задач, требующих гйдирования по предельно слабым объектам.

Некоторые авторы считают, что завышенные предельно достижимой проникающей силы составляет не две, а три звездные величины. Пожалуй, такая оценка слишком пессимистична. Вернемся к рис. 27. Кривая I иллюстрирует изменение проникающей силы в зависимости от диаметра объектива при отличных условиях наблюдений, полноценном зрении, идеальной оптике и отсутствии помех, препятствующих зрительному восприятию. Кривая II иллюстрирует проникающую силу гйда для усредненных реальных условий и среднем качестве оптики. Частота встречаемости оценок, согласующихся с кривой II, во много раз превосходит число оценок, соответствующих идеальным условиям и идеальной системе. Следовательно, кривая II намного более достоверна, чем кривая I. Есть много оснований считать данные, получаемые с помощью кривой II, надежными, не ведущими к потере информации за счет гйда.

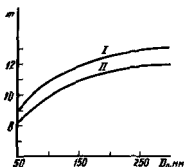


Рис. 27. Проницающая сила гйда в зависимости от диаметра объектива: *I* — для идеальных, *II* — для средних условий.

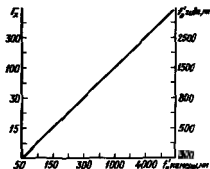


Рис. 28. Зависимость между фокусными расстояниями камеры и увеличением гйда по Вокулеру и Тексеро.

Независимо от иных характеристик увеличение гйда Γ_x может быть заключено, по Максудову, в пределах $0,8 D_0 < \Gamma_x < 2 D_0$, но наиболее оптимальным следует считать значение $\Gamma_x = 1,2 D_0$, так как последнее хорошо подтверждается практикой наблюдений. Современные окуляры с асферической оптикой позволяют достигать увеличений несколько больших, чем $\Gamma_x = 2 D_0$, но надобность в них встречается редко.

Точность гидирования неподвижных относительно фона звезд объектов при фотографировании требует, чтобы возможное смещение объектов только за счет гидирования не превышало величины кружка рассеяния на фотографической эмульсии. Ж. Вокулер и Ж. Тексеро, обобщая опыт работы с малыми камерами, получили зависимость между фокусным расстоянием камеры и увеличением гйда, хорошо удовлетворяющую требованиям практики. На рис. 28 такая зависимость представлена графически. Поскольку качество изображений в одном и том же месте наблюдения меняется за счет метеорологических факторов, необходимо иметь некоторый "запас" проницающей силы, не менее чем на одну звездную величину по сравнению с данными рис. 28.

Достаточно полный обзор влияния астроклиматических факторов на качество изображений на основе многочисленных результатов специальных исследований сделан в книге П.В. Щеглова, но для инструментов значительных размеров, намного превосходящих рассматриваемые нами. Конечно, соответствующие экстраполяции в сторону малых инструментов вполне возможны, но они сопровождаются многими ограничениями, связанными в основном с размерами структурных неоднородностей атмосферы, ответственных за размывание изображений в процессе фотографирования.

В настоящее время нет единого мнения о том, можно ли с абсолютной уверенностью определить предельную величину обнаруживаемых визуально при гидировании смещений объекта. Освещенность небосвода посторонними источниками света, предстояние зрению наблюдателя, его возможная усталость, наличие внешних раздражителей при наблюдении, тип окуляра и его положение в пространстве, применяемое увеличение, характеристики поля зрения, тип и характер (и цвет) освещения сетки нитей, изме-

нение яркости объекта в процесс гидрирования — эти и еще многие другие, менее важные факторы в той или иной мере изменяют пределы наиболее вероятного смещения изображения при гидрировании. Данному вопросу уделяли много внимания Д.Д. Максотов и И.С. Астапович, справедливо полагая, что можно значительно увеличить информационную способность визуальной системы, если предпринять при наблюдениях некоторые меры. Большой опыт визуальных наблюдений с малыми инструментами, накопленный Астаповичем, в свое время позволил значительно повысить качество наблюдений "трудных" объектов — метеоров.

Наблюдательная практика позволяет сделать еще один довольно интересный вывод. Поскольку параметры гида в подавляющем большинстве случаев не подбираются специально, а используются гида подходящих, по мнению наблюдателей, параметров, в результате своеобразной естественной технологической селекции "усредненный" гид достаточно хорошо удовлетворяет требованиям наблюдателя к фотографической системе в целом. Характеристики такого гида представлены на рис. 29; они получены по данным для большого числа самых разнообразных короткофокусных фотографических комплексов, в том числе и любительских. На рис. 29, а показана зависимость между фокусными расстояниями камеры и гида, на рис. 29, б — связь между фокусным расстоянием гида и его увеличением. Средняя кривая представляет идеальную зависимость, заштрихованная полоса — область допустимых значений величин, а граничные линии по сторонам от заштрихованной области показывают область возможных, но уже не желательных соотношений, еще встречающихся на практике. Несмотря на вероятный, порядка 20–30%, разброс эмпирических данных, приведенные зависимости в какой-то мере позволяют ориентироваться в выборе оптических параметров гида.

В последние годы опубликованы работы Г.М. Полова, которые позволяют надеяться на то, что мощность визуальных гидрирующих систем будет значительно повышена путем улучшенной ахроматизации оптики в самом ближайшем будущем, а также за счет роста светосилы этих систем и роста их полезного поля зрения.

Довольно успешные опыты использования телевизионного преобразования изображений в визуальных системах также вселяют надежду в то, что проникающая сила гидрирующих систем в ближайшие годы будет зна-

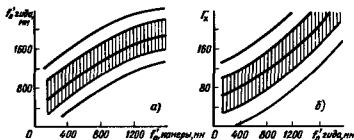


Рис. 29. Эмпирическая зависимость между фокусными расстояниями камеры и гида (а) и фокусным расстоянием гида и оптимальным увеличением гида (б).

чительно повышена. Преимущества телевизионного преобразования изображений делают процесс гидрирования более удобным и менее утомительным, так как возможен перенос изображения из фокальной плоскости гида в рабочее помещение наблюдателя. Этот процесс, пока коснувшийся лишь крупнейших инструментов, испытывает хорошую тенденцию ко всеобщему распространению в наблюдательной практике астрономии, в том числе и в отношении малых оптических систем.

Однако в настоящее время сохраняется необходимость использования чисто визуальных гидрирующих систем, в полной мере реализующих свойства нашего зрения. Поэтому рассмотрим вкратце некоторые вопросы, связанные со свойствами зрения, такие, которые играют наиболее существенную роль в процессе визуальных наблюдений: при визуальном гидрировании наше зрение является единственным источником информации о контролируемом нами процессе фотографирования.

Практически во всех случаях наблюдений гидрирование ведется при полном отсутствии солнечного света (ночью) или при его сильно ограниченном воздействии (в сумерки). В процессе работы наблюдатель связан с необходимостью перехода из освещенного пространства в неосвещенное и, следовательно, стоит перед необходимостью адаптации к темноте. Во время перехода от дневного зрения к ночному, когда чувствительность глаз резко возрастает из-за смены механизма дневного зрения на ночной, имеет место эффект Галисо, выражающийся в том, что в сумерки чувствительность глаз к красным лучам значительно выше, чем к синим. Но после того, как переход к ночному зрению завершен, проявляет себя совершенно иной эффект: при очень низкой освещенности чувствительность глаз к синим лучам резко возрастает. Это — явление Пуркины, оно прямо противоположно эффекту Галисо.

Значением обоих этих эффектов не следует пренебрегать при решении вопроса, например, об освещении поля зрения гида и спектральном составе источника света. Как правило, при гидрировании не приходится встречаться с объектами синего или красного цвета. Но с избытками того или другого цвета встретиться можно, и тогда эффекты Галисо и Пуркины могут сыграть отрицательную роль, особенно когда гидрируемый объект имеет предельно низкую яркость. Здесь может себя проявить такая особенность системы окуляра, как остаточный хроматизм (недоисправление хроматизма оптики окуляра) в какой-либо части спектра. По мере приближения объекта к краям поля зрения — там, где хроматизм изображения наиболее велик, может произойти фиктивная потеря объекта, т.е. он перестанет быть видимым, тем более, что проникающая сила окуляра на краю поля зрения понижена вообще и, следовательно, в некоторой части спектра особенно значительно.

Отрицательными свойствами глаза являются эффекты лучистости и иррадиации, хорошо знакомые нам по наблюдению далеких источников света точечного характера. Лучистость возникает при светорассеянии в хрусталике глаза и стекловидном теле его, она сильно зависит от формы контура зрачка глаза. Следствием этого эффекта является то, что звезды видны с "лучами" разной длины по разным направлениям. Стабильность эффекта можно легко проверить, поворачивая голову: форма и длина лучей при этом не меняются. Иррадиация также есть следствие светорас-

сеяния, но нужна сетчатка глаза. В первом приближении иррадиация пропорциональна яркости источника света, она сильно увеличивает угловой поперечник объектов (в случае объектов точечного характера их поперечник увеличивается иррадиацией до $1' - 2'$). Следовательно, сильно ухудшается разрешающая способность глаза.

Инерция зрения ведет к тому, что глаз сохраняет зрительное впечатление даже после прекращения действия света. При наблюдении вспыхивающих источников света может наступить такое состояние зрения, когда отдельные вспышки сливаются и наблюдатель видит почти на изменяющийся по яркости источник света. Величина инерции зависит от яркости источника света, яркости фона, цвета источника и фона, возраста наблюдателя и многих разнообразных факторов.

Острота зрения — свойство глаз видеть раздельно близкие светящиеся объекты. Она зависит от соотношения яркостей объектов, их цвета, яркости и цвета фона. Теоретический расчет показывает, что могут быть различны два одинаковых по яркости объекта (невысокой яркости), если угловое расстояние между ними не менее $1'$. За счет лучистости и иррадиации величина возрастает до $2'$; если же оба источника имеют различную яркость, то острота зрения может снизиться до $3' - 4'$.

Приспособляемость глаз к условиям освещенности называется адаптацией. Величина адаптации (иногда ее называют широтой адаптации) очень велика: глаз довольно быстро приспособляется к изменениям освещенности в окружающем пространстве. Например, при переходе от дневной освещенности к ночной, т.е. от 10^5 лк до 10^{-3} лк, достаточно времени адаптации порядка 30 минут. Обратный переход совершается примерно за такое же время. Отсюда можно сделать вывод, что быстрая смена освещенности окружающего пространства значительно снижает светочувствительность глаз (например, освещение наблюдательного павильона лампами дневного света, которые испускают прерывающийся сто раз в секунду поток, снижает светочувствительность глаз за счет непрерывного раздражения в десятки раз). Опытные наблюдатели никогда не пользуются яркими источниками света в рабочих павильонах во время наблюдений и даже в перерывах между наблюдениями, предпочитая адаптироваться к темноте постепенно. Интересно, что кратковременная засветка глаз слабым рассеянным красным светом значительно сокращает время адаптации и повышает чувствительность глаз.

Значительная работа по исследованию всех подобных эффектов проделана И.С. Астаповичем в связи с разработкой методики визуальных наблюдений метеоров. В частности, детально изучено влияние внешних раздражителей на пороговую чувствительность глаз, их разрешающую способность, а также на адаптационные эффекты. Астапович считает, что информационные способности глаз человека в совокупности их свойств могут меняться в пределах одного порядка для различных наблюдателей в различных условиях. Но такая разность свойств, например, светочувствительности, означает разность в проникающей силе глаз — без употребления телескопа почти на две с половиной звездные величины. Поэтому нельзя, с учетом всего сказанного выше, использовать рабочие формулы для вычисления проникающей силы визуальных оптических систем. Было бы лучше считать, что теоретические расчеты дают возможность ориентироваться в вопросе

об определении максимальной визуальной проникающей системы "глаз — телескоп", но не определять ее точное численное значение, часто создающее ложное представление о возможностях визуальных систем.

§ 7. Искажения поля изображений при панорамном фотографировании

Панорамные фотокамеры обладают своими, подчас снижающими их эффективность, характерными особенностями, которые в общем присущи и обычным покадровым методам фотографирования. Однако эти недостатки проявляются в обоих методах фотографирования неодинаково из-за больших различий самого процесса получения изображения: при панорамном методе изображение получается путем последовательного сканирования последнего с помощью щели, расположенной вблизи фокальной плоскости, при покадровом фотографировании изображение получается сразу все. В первом случае нарушается принцип одновременности фиксирования изображений на всем поле, но зато могут быть частично устранены некоторые aberrации. Во втором случае принцип одновременности фиксирования изображений не нарушается, но aberrации, присущие оптической системе, проявляют себя полностью и уменьшение их влияния затруднено.

В последующих параграфах будут рассмотрены некоторые особенности, сопровождающие процесс панорамного фотографирования. В качестве исходной будем в дальнейшем принимать фотокамеру типа системы Моёссара, обладающую почти всеми характерными чертами панорамных фотокамер. Будут рассмотрены также ошибки поля изображений, растяжение изображений звезд и неровности и деформации пленки.

Один из главнейших недостатков оптических систем — дисторсия — вызывает нелинейные искажения геометрии поля изображений. Оптики стремятся добиться такого положения, чтобы создаваемые ими системы сохраняли в поле изображений условия строгого подобия объекту — условие так называемой ортоскопии. Однако разрабатываемые системы даже при теоретически точном расчете не могут быть идеально изготовлены, и их поверхности, как правило, не соответствуют расчетным. Оптические элементы подавляющего большинства систем имеют сферические поверхности и обладают сферической aberrацией. Согласно строгой теории для таких систем совершенно безразлично, где расположена диафрагма, ограничивающая входящие в систему пучки света. В результате за счет этих двух причин сферической aberrации размеров и положения диафрагмы — условие ортоскопии нарушается.

В идеальном случае изолинии дисторсии являются окружностями, концентрическими оптическому центру поля изображений, но на практике по целому ряду причин они представляются овалами, с произвольно ориентированными в плоскости изображений осями.

Дисторсия может также возникнуть, если перед фокальной плоскостью поместить плоскопараллельную пластину (или светофильтр). Искусственное искривление поля изображений или вращение оптической системы около оптической оси в процессе фотографирования, линейное смещение оптической системы, наклон (неортотональность) поля изображений к оптической оси — все эти причины могут быть источниками эффекта дисторсии, их можно ослабить путем принятия соответствующих мер. Сферическую

абберацию можно устранить только у некоторых симметричных систем с диафрагмой в центре симметрии.

Если объектом фотографирования является квадрат, расположенный в плоскости, перпендикулярной оптической оси системы, на расстоянии, во много раз превышающем фокусное, то за счет нарушения ортоскопии его изображение может иметь форму двоякого рода: "подушкообразную" или "бочкообразную". В первом случае дисторсия называется положительной, во втором — отрицательной.

Рассмотрим рис. 30, на котором изображен первый случай. Неискаженный квадрат представлен контуром $ABCD$, искаженный — контуром $A'B'C'D'$. Выберем некоторое произвольное направление OQ_i от оптического центра O , на нем лежат точки K_i и K'_i . Назовем относительной дисторсией величину

$$C_i = (OK'_i - OK_i) : OK_i.$$

Если дисторсия имеет регулярный (относительно оптического центра O) характер, то величина C_i при любом направлении на данном расстоянии от оптического центра поля O будет постоянной. Реальные системы таким свойством не обладают. Иногда вместо величины C_i необходимо знать отношение площадей ΔS искаженного контура к площади неискаженного ΔS_0 . Можно найти это отношение, принимая во внимание малую величину дисторсии C_i , в виде $\Delta S : \Delta S_0 = 1 + 4C_i$.

Согласно теории Л. Зейделя, дисторсия не зависит от величины относительного отверстия, но зависит от третьей степени угла поля w° . В том

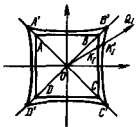


Рис. 30. Искажение поля изображений дисторсией.

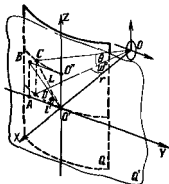


Рис. 31. Влияние дисторсии при панорамном фотографировании.

случае, когда объект расположен бесконечно далеко от задней главной точки системы, относительную дисторсию можно представить в виде

$$C_i = \operatorname{tg} w_i^\circ : \operatorname{tg} w^\circ - 1$$

с достаточно хорошим приближением. Здесь w° — угол между падающим на объектив лучом, проходящим через заднюю главную точку, и оптической осью, w_i° — угол, который этот луч, выходя из задней главной точки, образует с оптической осью. При равенстве этих углов дисторсия равна нулю и система ортоскопична. Знак дисторсии зависит от соотношения углов w°

и w_i° . Формула дисторсии, приведенная выше, применима для определения последней в случае наблюдения астрономических объектов, находящихся практически бесконечно далеко от оптической системы.

Независимо от знака или регулярности характера дисторсии ее изолинии в случае панорамного фотографирования будут иметь вид прямых, параллельных направлению сканирования панорамы, следовательно, дисторсия при панорамном фотографировании меняет свой характер: вместо двумерной становится одномерной. Последнее обстоятельство имеет очень важное значение, так как существенно упрощает учет нарушения ортоскопии при измерениях на панорамном снимке. В этом состоит одно из важных преимуществ панорамного метода фотографирования, особенно в случае астрономических исследований, преследующих астрометрические цели.

Каков геометрический смысл дисторсии при проектировании изображений на цилиндрическую поверхность? На рис. 31 показана схема построения на цилиндрической поверхности панорамы изображения точек, расположенных вне оптической оси. Здесь A и B — точки поля изображения, приходящиеся на край щели, D и C — соответствующие им точки на цилиндрической поверхности, O — задняя главная точка системы, O' — оптический центр поля изображений, XYZ — система прямоугольных координат с началом в точке O' , Q' — поле изображений, Q — цилиндрическая поверхность с радиусом r , равным f'_0 , касательная плоскости Q' по оси $O'Z$.

Поскольку цилиндрическая поверхность круговая, дуга $O'D$, расположенная в плоскости, перпендикулярной оси Z , является частью окружности, и ее длина равна $l = O'D = \pi r w_Y^\circ : 180^\circ \approx \pi f'_0 w_Y^\circ : 180^\circ$. Длина отрезка $O'A = l'$ в поле изображений равна $l' = f'_0 \operatorname{tg} w_Y^\circ$, где w_Y° — полуширина щели сканирования. Значение дисторсии вдоль оси Y определится с помощью формулы

$$C_l = \frac{l - l'}{l} = \frac{\frac{\pi f'_0 w_Y^\circ}{180^\circ} - f'_0 \operatorname{tg} w_Y^\circ}{\frac{\pi f'_0 w_Y^\circ}{180^\circ}} = 1 - \frac{206\,265'' \operatorname{tg} w_Y^\circ}{w_Y^\circ}.$$

Это выражение близко к нулю при малой угловой полуширине щели w_Y° , так как тангенс малого аргумента может быть заменен на первый член разложения его в ряд.

Прямая $O'B$ отобразится на поверхности цилиндра в виде кривой $O'C = L$. Но любое сечение цилиндра, кроме сечения плоскостями $XO'Y$ и $XO'Z$, есть эллиптическое, поэтому L есть дуга эллипса, имеющего некоторые параметры. Малая ось эллипса в нашем случае всегда равна фокусному расстоянию системы: $r = f'_0$, большая ось является функцией угла $AOB = \theta$. При $\psi = 0$ оси эллиптического сечения равны и сечение является окружностью с радиусом, равным фокусному расстоянию f'_0 . При произвольном значении угла θ имеем: $b = r = f'_0$, $a = b \sec \theta = f'_0 \sec \theta$, или же $a = r \sec \theta = f'_0 \sec \theta$. Расстояние между фокусами эллипса $c = r \operatorname{tg} \theta = f'_0 \operatorname{tg} \theta$, откуда эксцентриситет эллипса $e = \sin \theta$.

Таким образом, искажение масштаба изображений в случае цилиндрического поля изображений происходит не в радиальном направлении отно-

сительно оптического центра поля, а по дуге эллипса. Но при незначительной величине отрезка BC , что имеет место при малой ширине щели, даже при больших значениях угла поля θ , кривизна дуги $O'C$ настолько мала, что не будет значительной ошибкой считать $O'C$ прямой.

Дисторсия в направлении оси Z примет вид $C_Z = \cos i \gamma - 1$; знак дисторсии в данном случае будет отрицательным, так как CO' всегда меньше, чем BO' .

Отметим характерную особенность: чем меньше ширина щели, тем меньше разность между BO' и CO' . В направлении оси Z величина дисторсии на плоскости и на поверхности цилиндра будет одинаковой. Отсюда следует еще один вывод: в случае фотографирования на цилиндрическую поверхность при малой ширине щели дисторсию поперек последней можно считать равной нулю, а вдоль щели рассчитывать ее так же, как для плоского поля изображений. Это обстоятельство позволяет исследовать дисторсию панорамного комплекса с помощью известных методов. Поскольку астрономическое применение панорамного метода фотографирования требует учета всех сопутствующих источников ошибок, учет дисторсии обязателен, так как последняя весьма существенно влияет на точность результатов измерений и в конечном счете на окончательные выводы при решении той или иной задачи.

Линейное искажение поля изображений возникает при изменении масштаба снимка за счет температурной дефокусировки панорамной фотокамеры.

Масштаб снимка в центре поля выражается известной зависимостью $M'' \text{ мм}^{-1} = 206\,264''/8 \cdot f_0'$.

Изменение же масштаба соответственно

$$\Delta M'' \text{ мм}^{-1} = -206\,264''/8 \cdot \Delta f_0' : f_0'^2.$$

Величина $\Delta f_0'$ есть функция нескольких параметров

$$\Delta f_0' = \Phi(B, t_c, \Delta L, Sp),$$

где B — атмосферное давление, t_c — температура окружающей среды, ΔL — механическое удлинение камеры под действием деформаций при различном положении камеры в пространстве в процессе фотографирования, Sp — спектральный класс объектов фотографирования.

В случае короткофокусных камер влияния всех параметров, за исключением температурного, малы и их можно не учитывать. Изменение температуры ведет к изменению фокусного расстояния объектива, иногда в значительных пределах. Изменение фокусного расстояния $\Delta f_0'$ камеры происходит из-за изменения кривизны линз объектива, изменения расстояния между линзами и изменения длины самой фотокамеры. Поскольку разделять экспериментально все эти составляющие трудно, их изучают в совокупности и затем определяют их влияние на масштаб изображения.

Для устранения указанных факторов можно применить метод термической компенсации оправы объектива и камеры, создать новые стекла с низким температурным коэффициентом расширения и получить в результате систему, масштаб которой очень мало меняется в зависимости от темпера-

туры. Такие системы в настоящее время успешно разрабатываются и применяются на практике.

Широко распространенные оптические системы имеют температурный коэффициент в пределах $9 \cdot 10^{-6} \text{град}^{-1} \div 10 \cdot 10^{-6} \text{град}^{-1}$. При повышении температуры окружающей среды кривизна поверхностей всех линз системы увеличивается и, следовательно, фокусное расстояние уменьшается. Металлическая оправка объектива при этом удлиняется, растет расстояние между компонентами оптической системы, значит, растет и фокусное расстояние. При соответствующем подборе материала оправы возможна взаимная компенсация обоих изменений. Следует заметить, что создание температурной компенсации может вызвать изменение кривизны поверхностей компонент оптической системы и нарушение расчетных условий по устранению тех или иных aberrаций. Поэтому механическую компенсацию термических изменений можно применять с некоторой осторожностью, поскольку aberrации могут возрасти настолько, что система станет непригодной для решения поставленной задачи.

Если материал камеры — сталь с температурным коэффициентом α_t , близким к $12 \cdot 10^{-6} \text{град}^{-1}$, то дефокусировка за счет только изменения длины камеры при изменении температуры на один градус составит при фокусном расстоянии, равном 500 мм,

$$\Delta f'_t = f'_0 \Delta t_c \cdot \alpha_t = 500 \text{ мм} \cdot 1^\circ \cdot 12 \cdot 10^{-6} \text{град}^{-1} = 0,006 \text{ мм}.$$

Отсюда погрешность в масштабе будет

$$\Delta M'' \text{ мм}^{-1} = -206\,264'' \cdot 0,006 \text{ мм} : 500^2 = -0'',0049 \text{ мм}^{-1}.$$

Расхождение положений на концах панорамы длиной порядка 1220 мм составляет величину $\Delta M'' \text{ мм}^{-1} \cdot 1220 \text{ мм} \approx 6''$, что довольно ощутимо при точных измерениях, например в астрометрических целях. Конечно, продольное изменение масштаба может быть распределено по всей длине панорамы и учтено в окончательных выводах по результатам измерений.

Наилучшим методом учета подобных влияний является определение масштаба путем измерений расстояний между звездами с известными координатами непосредственно на астронегативе. Если число звезд на фотографическом снимке велико, то с успехом могут быть использованы известные методы, применяющиеся в фотографической астрометрии для учета ошибок масштаба. Таков, например, метод Тернера.

Все сказанное свидетельствует о том, что формальное сравнение результатов измерений в различных частях панорамного снимка неправомерно, особенно тогда, когда панорамный снимок был получен в результате длительного сканирования, за время которого температура могла измениться значительно.

§ 8. Растяжение изображений звезд в процессе фотографирования

Одним из важных источников ошибок при определении положений объектов относительно звезд является так называемое "растяжение" изображений звезд на негативе. Причиной могут быть самые разнообразные факторы, сопутствующие процессу фотографирования. Рассмотрим из них наиболее существенные, по нашему мнению.

а) Ошибки в установке экваториальной монтировки камеры (несовпадение инструментального полюса с полюсом мира и неортогональность оси склонения и полярной оси монтировки). Для того чтобы оценить ошибки растяжения за счет этих двух причин, воспользуемся формулой, с помощью которой определяют ошибки установки полярной оси телескопа фотографическим методом:

$$\delta'_* - \delta_* = R_i \cos(P_i - t_*) + \frac{1}{2} (n^2 + c^2) \operatorname{tg} \delta_* + \Delta n \cdot \Delta c \cdot \sec \delta_* + \Delta \delta_0.$$

Здесь $\delta'_* - \delta_*$ — разность экспериментального и каталожного склонений звезды, R_i и P_i — координаты инструментального полюса, t_* — часовой угол звезды, n — отклонение от 90° угла между осями склонения и часовой (обычно оно на практике не превышает $0^\circ,1 - 0^\circ,5$), c — ошибка коллимации, δ_* — склонение звезды, $\Delta \delta_0$ — ошибка нуля-пункта градусного круга оси склонения.

В этой формуле величины n и c от времени не зависят, поэтому при дифференцировании формулы с целью получения численных значений ошибки "растяжения" изображения звезды члены, зависящие от n и c , исчезают. Следовательно, неперпендикулярность оси склонения к полярной не вызывает изменения формы изображений звезд даже при длительных экспозициях. Совершенно по-другому складывается влияние несовпадения инструментального полюса и полюса мира.

Поскольку инструмент вращается около инструментальной полярной оси, а небесная сфера — около земной полярной оси, то, естественно, происходит растяжение изображений звезд за время длительной экспозиции. Это растяжение особенно сильно заметно при фотографировании полярных областей и, наоборот, мало заметно при фотографировании областей вблизи небесного экватора. Величина растянутого трека звезды в первом приближении пропорциональна продолжительности экспозиции. Избежать этого эффекта можно путем самой тщательной установки полярной оси инструмента по азимуту и широте места наблюдения. В тех случаях, когда применяются короткофокусные камеры, достаточна точность установки оси по азимуту и широте порядка $0^\circ,5$.

б) Дифференциальная рефракция. В процессе суточного вращения небесной сферы высота светил изменяется в некоторых пределах, зависящих от широты места наблюдения и склонения светила. Рефракция света в земной атмосфере изменяет зенитное расстояние светила на величину $\rho'' = 58,3 \operatorname{tg} z$ (с точностью $\pm 1''$, если z дано с точностью до $1'$). Эта формула ограничено пригодна для зенитных расстояний, не превышающих 70° . На малых высотах рефракция вычисляется по специальным таблицам и формулам, дающим невысокую точность ввиду того, что вблизи горизонта в атмосфере проявляют себя много различных факторов, затрудняющих применение точной теории. Отметим только, что на горизонте рефракция составляет около $35'$, это значение сильно колеблется для различных времен года и различных мест на Земле в ту и другую сторону.

Если фотокамера имеет протяженное угловое поле порядка $10 - 30^\circ$, то рефракция изменит по-разному положение светил в нижней и верхней частях поля: в нижних сильнее, так как их зенитное расстояние больше, чем

верхних. При длительных экспозициях поле изображений вращается относительно вертикали, проведенной через оптический центр снимка. Поэтому высоты светил изменяются, а следовательно, изменяется и рефракционное смещение на снимке; их изображения оказываются растянутыми в треки. Длина последних незначительна, но их направление неодинаково в различных местах поля изображений. На практике происходит превращение круглых изображений звезд в овальные, причем большая ось овала незначительно превосходит диаметр диска Эри. Современная фотографическая астрометрия позволяет учесть указанный эффект.

в) Атмосферная дисперсия. Показатель преломления света в воздухе для лучей разных длин волн неодинаков; это свойство присуще всем оптически прозрачным средам. Лучи разных длин волн испытывают различное отклонение: атмосфера до некоторой степени подобна призме, но в отличие от нее имеет переменную, падающую с высотой плотность. В результате изображение каждой звезды растягивается в вертикальный спектр с красным концом внизу. Зависимость длины спектра (в интервале длин волн 0,4–0,8 мкм) в функции от зенитного расстояния может быть определена по формуле, выведенной Баумом:

$$\Delta L'' = 0,335 \left(\frac{1}{\lambda_1^2} - \frac{1}{\lambda_2^2} \right) \operatorname{tg} z^\circ.$$

где $\Delta L''$ — длина спектра, λ_1 и λ_2 — длины волн границ спектральной области, в пределах которой рассматривается эффект.

До зенитных расстояний порядка 30–40° растягивание изображения звезды в спектр сравнимо с величиной турбулентного диска звезды (образованного в результате атмосферной турбулентции), но при зенитном расстоянии 60° длина спектра достигает уже почти 3", а у горизонта почти 9". В последнем случае при масштабе в центре поля 412" мм⁻¹ в линейной мере растяжение составит около 0,022 мм. Конечно, растяжение мало по сравнению с диаметром турбулентного диска звезды на такой высоте, даже ночью незаметно. Но при больших фокусных расстояниях фотографических систем влияние растягивания звезд в спектр становится заметным. Оговоримся, что такое положение будет иметь место только в том случае, когда используемый фотоматериал имеет чувствительность к красной части спектра. Стеклопленочные же объективы короткофокусных фотокамер обладают очень сильным поглощением в синей части спектра. Поэтому на практике величина растянутости звезды в спектр на негативе будет раза в два меньше, чем это следует из теоретических соображений.

г) Случайные рефракционные явления. Эти явления обнаруживают себя в области очень малых высот над горизонтом. Их происхождение обязано целому ряду природных факторов, таких, например, как наличие водоемов, перегреваемых днем и отдающих тепло атмосфере ночью, что вызывает восходящие потоки воздуха пониженной плотности, или же горных крутых склонов, по которым плотный холодный воздух ночью стекает в долины, вызывая рефракционные аномалии.

Во время фотографирования на небольших высотах все эти причины могут приводить к кратковременным малым смещениям светил в поле изображений. Судя по литературным данным, подобные смещения — свое-

образная случайность, амплитуда которых может достигать величины $1'' - 3''$, а время существования от $0^s,1$ до одной-двух секунд. Если светила наблюдаются через зону таких рефракционных явлений, то их смещения могут происходить не только в вертикальном направлении, но и в горизонтальном, что делает учет подобных факторов сложной, а иногда и неразрешимой задачей. Эмпирический учет также затруднен, так как подобные явления относятся, вообще говоря, к разряду спорадических и могут не повторяться или же повторяться, совершенно меняя свой характер.

д) Термические деформации некоторых элементов конструкции гида и фотокамеры. При значительных изменениях температуры в процессе длительных экспозиций может себя проявить еще один эффект, ведущий в конечном счете к растягиванию изображений звезд в ноее изображений. Это - несимметричные термические деформации отдельных узлов фотографического комплекса таких, например, как кассетная часть камеры или окулярная часть гида. Механическая асимметрия последних, особенно если они по каким-то причинам выполнены из разнородных материалов с сильно различающимся температурным коэффициентом расширения, приводит к целому ряду деформаций, изменяющих относительное положение оптических осей гида и камеры.

Соответствующая технология изготовления фотографического комплекса обычно учитывает возможность проявления подобных эффектов заранее, но при конструировании комплексов на базе случайной оптики и при ограниченных технологических возможностях термические деформации могут проявить себя совершенно неожиданным образом. Их влияние на качество изображений звезд учесть трудно, хотя экспериментальному исследованию эти факторы поддаются. Максимальные значения смещений изображений едва ли достигают нескольких десятых долей секунды дуги в самых худших случаях, поэтому в случае короткофокусных камер искажения изображений звезд практически незаметны.

е) Дифференциальное гнутие гида комплекса. Обычно конструктивно гид и фотокамера объединяются в едином корпусе, но иногда, по соображениям технологического или иного характера, оба элемента выполняются отдельно и затем соединяются между собой способом, обеспечивающим, по мнению изготовителя, необходимую жесткость всей системы в целом. Но в процессе фотографирования положение комплекса в пространстве произвольно и учесть влияние механических деформаций трудно. Следовательно, вариант раздельного выполнения гида и фотокамеры является с точки зрения механики намного менее удачным, чем тот, при котором оба эти главных элемента комплекса объединены в едином корпусе. Дифференциальное гнутие проявляет себя заметным образом при значительной длине гида или сильно вынесенной из корпуса окулярной части.

ж) Кручение тубуса гида. Эта деформация происходит в результате резко нарушенной относительно оптической оси механической симметрии частей гида, особенно при использовании "ломаного" окуляра с микрометром, имеющим значительную массу. В различных положениях относительно горизонта этот эффект проявляет себя иногда довольно явно, особенно тогда, когда в процессе фотографирования происходит нерекладка инструмента из положения "к востоку от меридиана" в положение "к западу от меридиана". Эффект кручения может скачком изменить свой знак, удвоив

растяжение изображения звезды. Конструкция окулярной части гида по указанным соображениям должна быть максимально устойчивой в отношении этой деформации.

Особенно опасен эффект, когда механическая ось симметрии гида и его оптическая ось образуют некоторый угол. Поворот всего корпуса гида в удерживающих его консолях приводит в последнем случае к смещению оптической оси гида относительно оптической оси камеры и, как следствие, к растягиванию изображений звезд. В этом состоит еще одна из причин, по которым конструкторы стараются объединить гид и камеру в одном корпусе, жестком в механическом отношении.

з) Низкая жесткость блоков объектива камеры и гида и кассетной части камеры. Изменение зазоров между линзами объектива и оправой может приводить к смещению изображения в плоскости негатива. При диаметре объектива 100 мм и фокусном расстоянии 500 мм изменение диаметра дюралюминиевой оправы за счет изменения температуры всего на 10° ведет к наклону оптической оси на $6''$. Это соответствует, в масштабе системы, в линейной мере величине порядка 0,015 мм. Величина сравнительно небольшая, но если учесть, что при этом происходит, как говорилось выше, еще и изменение фокусного расстояния, то можно сделать вывод о том, что положение звезд только за счет этого эффекта будет искажено.

Намного хуже, если оправа при понижении температуры сжимает линзы объектива: в этом случае изменяется структура изображения, возникает так называемый инструментальный астигматизм из-за механических напряжений в линзах. К почти аналогичному эффекту смещения изображения может привести недостаточная жесткость крепления кассеты в кассетной части или нежесткое крепление фотоматериала в самой кассете. Эффект легко обнаруживается, так как проявляет себя всегда одинаково в растяжении изображений звезд на негативе в одном каком-либо направлении.

Итак, оказывается, что причинами растяжения изображений звезд в поле изображений могут быть самые различные факторы механического (внутреннего) и физического (внешнего) характера. Если бы действие всех указанных факторов проявляло себя по одному какому-либо определенному направлению в поле изображений, то растяжение звезд могло бы оказаться недопустимо большим. Однако обычно смещения происходят по самым разнообразным направлениям, и конечным результатом часто оказывается не растяжение изображений, а их размывание.

Чтобы оценить возможное влияние размывания на качество изображения, рассчитаем диаметр диска Эри для идеального объектива и идеальных условий фотографирования на фотоматериале с высокой разрешающей способностью (мелким зерном эмульсии). Для средних длин волн ($\lambda \sim 550$ нм) и относительного фокуса $V = 5$ диаметр диска Эри близок к 0,0007 мм. В случае серийной оптики, как показывает практика ее эксплуатации, изображение имеет диаметр в три раза больше вычисленного даже в центре поля, т.е. порядка 0,002 мм. За счет рассеяния света в эмульсии и эффектов, сопровождающих химическую обработку, эта величина возрастает не менее чем вдвое, до значения 0,004 мм. Аберрации третьего порядка, в их сумме, доводят полученное значение до 0,040 мм. А так как площади кругов относятся как квадраты их диаметров, то, следовательно, площадь реального изображения точечного монохроматического объекта

превосходит площадь идеального изображения в несколько сотен раз! Кроме того, за счет атмосферной неустойчивости величина кружка рассеяния, полученного в результате фотографирования звезды, достигает для рассматриваемой фотографической системы и блеска звезды от третьей до пятой звездной величины значения, близкого к 0,150 — 0,100 мм. При фотографировании более слабых звезд, например седьмой — десятой звездной величины размер изображения несколько меньше, порядка 0,050 мм. Допустим, что фотографируются слабые объекты, и примем размер кружка изображения 0,050 мм. Тогда за счет всех факторов, которые вызывают растяжение изображений звезд, поперечник кружка увеличится до размеров 0,150 мм.

Кажущееся незначительным, это увеличение поперечника кружка рассеяния приводит к потере проникающей силы фотографической системы на две-три звездные величины в лучшем случае. Поэтому теоретические расчеты проникающей силы оптических систем, не учитывающие всех факторов, снижающих последнюю, не являются реальными. Подтверждением тому является богатая практика использования как в СССР, так и за рубежом короткофокусных систем.

Помимо этого, растяжение изображений, не выводя само изображение за пределы некоторого кружка рассеяния, может вызвать очень неравномерное распределение почернения внутри самого кружка даже при работе с короткофокусными системами. А это приводит к неправильному блескостроению при измерениях на координатно-измерительных машинах. К тому же в разных частях поля изображений эффект растяжения проявляет себя по-разному. Использование короткофокусных оптических систем требует самого тщательного их исследования, если они предназначаются для сколько-нибудь точных определений положений светил.

При исследованиях, не требующих высоких метрологических характеристик от используемой оптической системы, таких, как метеорные или исследования диффузных протяженных объектов, факторы, искажающие положение объектов в поле изображений, не имеют существенного значения, ибо они могут изменить только фотометрические характеристики изучаемых объектов и то настолько незначительно, что этими изменениями можно спокойно пренебречь. Напомним еще раз о том, что все описанные в данном параграфе явления имеют непосредственное и существенное отношение к практике панорамного фотографирования.

§ 9. Неровности пленки и ее деформации со временем

Одной из особенностей панорамной съемки является то, что фотоматериал в панорамной камере располагается на поверхности цилиндра с радиусом, равным фокусному расстоянию объектива. При изгибе фотопленки в последней могут возникнуть неровности небольшого размера. Их причиной также могут быть отклонение толщины пленки от ее среднего значения, неоднородности подложки и эмульсионного слоя и т.п. Представляется, что выпуклость на фотопленке, имеющая высоту порядка сотых долей миллиметра, не может вызвать ошибок при измерении негатива с высокой точностью. Однако это не так.

Обратимся к схеме, иллюстрирующей влияние на измерения подобной выпуклости (рис. 32). Пусть щель S имеет конечную ширину d , a_1 и a_2 — изображения двух точек на цилиндрической (недеформированной) поверхности пленки, a'_1 и a'_2 — их изображения на искаженной поверхности (масштаб, естественно, сильно увеличен). Так как щель практически близка к оптической оси, то, несомненно, искажение положений в направлении поперек щели будет малым. Но расширение изображения будет иметь место, причем круглое изображение звезды, например, в результате станет овальным. При измерении негатива будет трудно оценить центр изображения звезды, что поведет к ошибке определения ее положения.

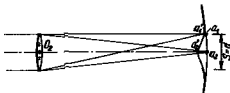


Рис. 32. Искажение изображения выпуклостью фотопленки вблизи оптической оси.

Из рис. 32 следует, что степень расширения пропорциональна величине относительного фокуса объектива V и искривлению фотопленки Δ . Экспериментальные данные позволяют оценить степень линейного расширения изображения для случая ширины щели порядка 10 мм и отклонения Δ от цилиндрической поверхности, заключающегося в пределах $\pm 0,005$ мм. Принимая для V значение, допустимое на практике в пределах от 2,0 до 6,0 при длине волны $\lambda \sim 550$ нм, найдем, что относительное расширение изображения точки a_1 будет порядка $\sim 0,004 - 0,008$ мм. Это составит почти 20% от теоретического значения диаметра изображения точки — диска Эри. Поперечник последнего зависит только от длины волны света и относительного фокуса:

$$d = 2 \cdot 1,22 \lambda V = 2,44 \lambda V.$$

С учетом неоднородностей распределения светочувствительных зерен в фотографической эмульсии эффект расширения изображения оказывается не очень значительным: в подавляющем числе случаев им можно пренебречь.

Вопрос оказывается более сложным, когда рассматривается влияние неровностей фотопленки в областях, значительно удаленных от оптического центра, например в наиболее удаленных от оптического центра частях щели. При использовании широкоугольных объективов угол, под которым из задней главной точки объектива видна полуудлина щели, может быть значительным, и смещение изображения станет ощутимым. Этот случай приведен на рис. 33. Здесь O — оптический центр снимка, a — изображенная точки на цилиндрической поверхности, a' — на искаженной поверхности. $S = aF$ и $S' = a'F$ — соответственно расстояния этих изображений от оптического центра, $S - S' = \Delta S$ — разность положений точек. Пусть θ — угол положения точки относительно оптической оси, а точка a'' — проекция точки a' на пленку; тогда при $a'a'' = \Delta$ имеем $\Delta S : \Delta = \operatorname{tg} \theta$ и $\Delta S = \Delta \cdot \operatorname{tg} \theta$ с достаточной

хорошим приближением. Отсюда, при прежнем допущении $\Delta \sim 0,005$ мм и приемлемых значениях углов θ порядка $20-50^\circ$, получим следующее предельное значение ΔS :

$$\Delta S \approx 0,002 \div 0,006 \text{ мм.}$$

При современных требованиях к точности измерений это довольно ощутимое значение ошибки положения объекта.

Следовательно, неровности поверхности фотопленки являются источниками трудно учитываемых ошибок, поскольку на практике неизвестно, в каком месте негатива существенно влияние неровностей. Неизвестны и



Рис. 33. Искажение изображения выпуклостью фотопленки вне оптической оси.

геометрические параметры неровности: ее высота и поперечники. Наиболее значительное влияние этот эффект оказывает на положение объекта и на разрешающую способность всей системы в целом.

Так обстоит дело в том случае, когда фотопленка не выравнивается со стороны светочувствительного слоя, например, путем вакуумного присасывания к кассетной части панорамной камеры. Однако и при этом могут оставаться отдельные искривления поверхности малого размера, как показали специальные исследования с помощью самых чувствительных методов. Кроме того, на поверхности эмульсионного слоя фотопленки возможно наличие неровностей, обязанных своим происхождением недостаточно хорошему соблюдению производственной технологии.

Наиболее эффективным средством, позволяющим практически почти полностью устранить указанный эффект, является применение выравнивающего стекла, к которому прижимается светочувствительный слой. Это стекло должно обладать очень высокими оптическими качествами, чтобы самому не стать источником ошибок положений объектов на негативе. Главным здесь является точность геометрических размеров стекла и его высокая механическая жесткость. Деформации изгиба стекла, как показали исследования, при соответствующем расчете пренебрежимо малы и не являются источниками метрологических ошибок системы. Панорамные системы с цилиндрической фокальной поверхностью практически не допускают возможности использовать выравнивающее стекло, ибо при цели конечной ширины и особенно длины влияние цилиндрического стекла на процесс формирования изображений настолько велико, что необходим специальный расчет системы объектив — выравнивающее стекло как единой оптической системы. Это положение настолько усложняет вопрос о применении выравнивающего цилиндрического стекла, что последнее практически никогда не применяется в практике панорамного фотографирования.

Отрицательное влияние выравнивающего стекла рассмотрим на примере системы Дамуазо с подвижной пленкой. Допустим, что имеется прижимное стекло, вставленное в щель камеры. Изготовление такого небольшого стекла с цилиндрической формой поверхности возможно с высокой точностью. Но его применение ведет к следующим нежелательным эффектам.

а) При движении фотопленки по стеклу эмульсия неизбежно налипает на поверхность последнего, загрязняя стекло. Особенно это заметно при повышенной влажности атмосферы, когда происходит некоторое размягчение эмульсионного слоя и процесс налипания становится более интенсивным. Избежать этого эффекта трудно.

б) Возможно появление нежелательных дефектов поверхности пленки (царапины, чаще всего расположенных в направлении движения фотопленки). Такие дефекты особенно сильно проявляют себя при загрязнении фотопленки твердыми частицами, пылью в процессе зарядки кассетной части, поскольку фотопленка обладает электростатическими свойствами.

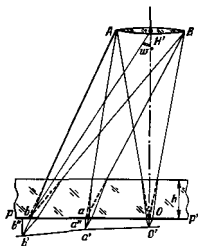
в) Стекло вызывает дополнительные светопотери, незначительные по величине, но при некоторых исследованиях совершенно нежелательные.

г) При больших значениях угловых полей возможно появление вторичных рефлексов от ярких областей некоторых объектов за счет многократного отражения света от поверхностей выравнивающего стекла.

д) Выравнивающее стекло является источником целого ряда абберационных эффектов, в частности хроматизма положения, искажающего результаты измерений. Например, для стекла толщиной 10 мм с показателем преломления $n \sim 1,5$ и дисперсией порядка 20 осевое смещение изображения в желтых лучах будет иметь величину порядка $0,1 - 0,2$ мм при угле больше 45° .

е) Сдвиг изображения вдоль оптической оси (дефокусировка) при указанных выше параметрах выравнивающего стекла настолько значителен, что пренебрежение им ведет к сильному искажению положений объектов в поле изображений.

В том случае, когда выравнивающее стекло представляет собой плоскопараллельную пластину, этот эффект может быть оценен наиболее просто.



На рис. 34 дана схема хода лучей, идущих от объектива системы через плоскопараллельную пластину толщиной h , где AB — объектив, H' — его задняя главная точка, $H'O$ — оптическая ось, O — оптический центр поля, PP' — фотопленка. Штриховой линией показан ход лучей в случае плоскости изображения Oab в отсутствие пластины; сплошными линиями — ход лучей, искаженный плоскопараллельной пластиной. Реальное поле изображений $O'a'b'$ отстоит от поля Oab на некотором расстоянии, изменяющемся в

Рис. 34. Схема действия выравнивающего стекла в плоскости изображений.

зависимости от угла поля ω° нелинейно. Таким образом, поле изображений за плоскопараллельной пластиной не только сдвинуто от объектива по ходу лучей, но и еще искривлено: становится выпуклым к объективу.

ж) Кроме осевого смещения, имеет место еще и ортогональное, которое ведет к так называемой радиальной дисторсии. Изолинии этой дисторсии — концентрические окружности (в идеальном случае) с центром в оптическом центре снимка. В случае панорамного фотографирования изолинии дисторсии будут прямыми, параллельными развертке панорамы. Это смещение показано на рис. 34 отрезками aa'' , bb'' .

з) Тонкие стеклянные пластины толщиной по 5–6 мм легко поддаются деформации изгиба. Прогиб пластины может быть вызван термическими эффектами, особенно в тех случаях, когда пластина жестко закреплена по всему своему периметру в оправе. Чтобы избежать прогиба плоскопараллельной пластины, ее толщина должна быть более 8 мм, а длина около 200–300 мм при ширине, не превышающей 50 мм.

и) В процессе изготовления выравнивающего стекла может быть допущена его клиновидность и локальные неоднородности его структуры, которые могут привести к появлению эффектов, сходных с эффектом радиальной дисторсии или эффектом искривления поверхности фотопленки. В конечном счете появится асимметрия поля панорамы: верхняя и нижняя ее половины будут, как это и вытекает из сказанного выше, иметь различные метрологические характеристики.

Исходя из всего сказанного, можно сделать заключение о нежелательности применения выравнивающего стекла при фотографировании вообще и при панорамном фотографировании в особенности. Если же применение выравнивающего стекла окажется по каким-либо причинам необходимым, то результирующее влияние его на качество получаемой информации лучше всего установить путем исследования всей системы в комплексе. Наилучшим, но не самым простым и легким является исследование с помощью фотографирования звездного неба.

Панорамное фотографирование позволяет получать поля изображений значительной протяженности. Использование современных фотопленок больших форматов заставило наблюдателей решать массу вопросов, связанных с процессом измерений полученных в результате фотографирования негативов. Панорамные снимки, в отличие от покادровых, могут иметь значительную линейную протяженность. Например, один панорамный снимок при угле панорамы 120° и фокусном расстоянии объектива камеры 500 мм имеет длину порядка одного метра. С помощью такого же объектива можно получить, пользуясь покадровым методом фотографирования, на таком же отрезке фотопленки три или четыре отдельных кадра. Но в первом случае будет один неразрывный снимок с единой системой координат, во втором — несколько отдельных, каждый из которых измеряется независимо от других. В первом случае случайные деформации фотопленки могут привести к эффекту "накопления" ошибки измерения, во втором случае эта ошибка будет распределена примерно равномерно между всеми кадрами, и ее влияние на результаты измерения пропорционально уменьшится. Такое различие между панорамным и покадровым методом фотографирования заставляет вести тщательный учет ошибок, возникающих за счет деформаций фотографической пленки.

Фото пленки в силу технологической необходимости приходится деформировать тем или иным путем в процессе перемотки, проявления, сушки, хранения, измерений. Химическая обработка меняет свойства подложки и эмульсионного слоя в различной степени, это может служить причиной "скручивания" фото пленки. При хранении фото пленки в рулонах изменение влажности окружающей среды ведет к изменению состояния наружных и внутренних слоев в разной степени. Присутствие в окружающей среде активных химических соединений влияет на состояние эмульсионного слоя сильнее, чем на состояние подложки. Процессы полимеризации подложки и эмульсии протекают медленно и имеют различный характер на краях фото пленки и ее внутренних областях. Обнаружен эффект различного хода процесса полимеризации фото пленки в областях с различной плотностью почернения: он связан с различием количества зерен серебра на единицу площади негатива. Имеет большое значение и то, что при изготовлении фото пленки в ней возникают случайные деформирующие напряжения, различные в продольном и поперечном направлении.

Рассмотрим характер продольных и поперечных деформаций пленки. Оговоримся сразу же, что в подавляющем большинстве случаев фото пленки со временем не растягиваются, а сжимаются. Достаточно полно этот вопрос исследован сотрудником Астрофизического института Тадж.ССР А.Г. Крыловым для интервалов времени до полугода. Как и ожидалось на основе теории деформаций полимеров, поперечные и продольные деформации оказались различными по величине: это различие составляет от 20 по 50%, причем в поперечном направлении сжатие происходит со временем быстрее, чем в продольном. Сжатие изменяется во времени нелинейно и меняет свой характер.

Локальные деформации пленки подозревались давно, ибо при повторных измерениях очень малых участков негативов обнаруживались значительные расхождения результатов, которые обычно приписывали различиям методик измерения и личным ошибкам измерителей. Однако специальные исследования показали, что на пленке реально существуют области поперечником 3 - 5 мм, которые деформируются совершенно независимо от их ближайших окрестностей.

Локальные области неоднородностей не имеют резких границ, но в первом приближении их можно считать круглыми. Как правило, преобладают области с избыточным (увеличением по отношению к окружающему полю) масштабом. Никакой закономерности в распределении этих областей на фото пленке не обнаружено. Величина избыточной (по отношению к окружающему полю) деформации мала, не превышает 0,0005 мм, но при особо точных измерениях положений близких объектов (двойных звезд, например), вероятность ошибок, возникающих в таких деформированных областях, необходимо учитывать.

Для обнаружения малых областей локальных неоднородностей необходимо впечатывать на непроявленный негатив сетку Готье (сетка с квадратными ячейками обычно размером 5 X 5 мм; употребляется с конца прошлого века в фотограмметрии). Сетка должна быть выполнена в негативном варианте: прозрачные линии сетки на черном фоне. Для увеличения вероятности обнаружения неоднородностей желательно иметь сетку с размерами ячеек не более чем 3 X 3 мм. Поскольку сетки изготавливаются на толстой

стеклянной подложке, тщательно полированной и обладающей по техническим условиям низким температурным коэффициентом (на два порядка более низким, чем у полимеров подложки фотопленки), сетка может служить хорошим носителем постоянного масштаба: любые деформации могут быть легко обнаружены по изменению размеров изображений ее ячеек и учтены при измерении положений объектов в тех частях негатива, которые подвержены деформациям. К сожалению, такой простой прием по каким-то причинам в астрономических исследованиях не практикуется даже в случае решения задач, требующих высокой точности измерений.

Следует отметить еще одну особенность фотопленок — очень высокую чувствительность к изгибам с малыми радиусами кривизны. При скручивании фотопленки в рулон в ней возникают напряжения, различные в продольном и поперечном направлениях. Так как коэффициент восстановления у полимеров очень низок, их деформации являются далеко не упругими и после каждой перемотки пленки в ней возникают новые и новые изменения состояния, часть из которых сохраняется на очень длительные промежутки времени или же навсегда. Если в процессе хранения часто меняются окружающие условия (температура, влажность воздуха), то измерения на некалиброванной с помощью сетки Готье пленке лучше не производить, давая ей отлежаться некоторое время. Наилучшим способом хранения фотопленки можно считать такой, при котором она распрямлена и зажата между плоскими пластинами, например, из стекла. При длительном хранении фотопленок необходимо изолировать их от воздействия окружающей среды. Особенно вредно на состоянии фотопленки сказываются значительные колебания температуры.

Таким образом, при всех своих достоинствах фотопленки обладают целым рядом отрицательных качеств, пренебрегать которыми недопустимо, если мы хотим извлечь максимальную информацию из негатива. Наблюдатель работает с самыми различными фотографическими материалами, и одной из главных его задач является тщательное их исследование.

После рассмотрения многих специфических особенностей панорамного фотографирования перейдем к описанию его применения для решения некоторых астрономических задач.

§ 10. Определение положения ИСЗ путем замещения его изображения в фокальной плоскости панорамной фотокамеры фиктивным репером

Обладая несомненными преимуществами — протяженным полем, несущим большую удельную информацию по сравнению с какадровым методом, и меньшими aberrациями, панорамный метод в то же самое время не позволяет, на первый взгляд, избавиться от специфических недостатков. При фотографировании на фоне неподвижных звезд движущихся объектов, в первую очередь ИСЗ, эффективная экспозиция оказывается малой.

И.С. Астапович на основании длительного опыта фотографирования метеоров заключает, что с помощью неподвижной камеры, имеющей объектив с $D_0 = 100$ мм при $V = 2,5$ на фотопленке $S_{0,85} \geq 1000$ ед. ГОСТ уверенно можно зафиксировать метеор при угловой скорости последнего $\omega_T = 20^\circ \text{ с}^{-1}$ и блеске $m \sim 0^m,7$ а при $\omega_T = 1^\circ \text{ с}^{-1}$ до блеска 4^m . Можно получить эмпирическую зависимость между предельной звездной величиной

движущегося объекта, чувствительностью фотоматериала и параметрами объектива.

На практике оказалось, что экстраполяция зависимости подобного рода в область малых угловых скоростей порядка $0^{\circ},01 \text{ с}^{-1}$ и ниже приводит к значительному расхождению между теоретически ожидаемыми предельно достижимыми величинами объектов и их экспериментальными значениями: последние всегда значительно меньше первых. В интервале угловых скоростей $20^{\circ} \text{ с}^{-1} > \omega_x > 0^{\circ},01 \text{ с}^{-1}$ можно использовать достаточно точную для практических целей формулу

$$m_{\max} = 0^m,7 + 2^m,512 \lg \frac{20^{\circ} \text{ с}^{-1}}{\omega_x},$$

где $m_{\max}$ предельно постижимая фотографическая величина при фотографировании на пленке указанной выше чувствительности. Так обстоит дело с движущимися объектами. Для звезд поля проникающая сила камеры может быть довольно значительной при условии, что камерв следует за ними.

Применение следящих за движущимися объектами камер ведет к тому, что изображения звезд растягиваются в направлении движения исследуемого объекта и проникающая сила камеры для опорных звезд становится малой, так как смещение камеры при слежении эквивалентно смещению изображений звезд со скоростью слежения. Есть и еще одно обстоятельство, которое до некоторой степени ограничивает применение метода слежения за движущимся объектом: искажения изображений звезд, получаемых в виде коротких дискретных треков, вследствие влияния аберраций и механических характеристик светопрерывающего устройства не позволяют уверенно определить на треке звезды точку, соответствующую некоторому фиксированному с большой точностью моменту времени наблюдения объекта. В результате положение объекта определяется с точностью более низкой, чем та, которую можно было бы ожидать от камеры с данными параметрами.

Применение фотозлектрического метода слежения за движущимися объектами, как показала практика, затруднительно: фотозлектрическое устройство очень часто стремится "захватить" в поле его зрения объект более яркий, нежели отслеживаемый, а так как в процессе слежения фотомножитель сканирует в общем случае произвольное поле звезд, то вероятность захвата случайно попавшей в зону захвата звезды очень велика. И, конечно, основной недостаток этого слежения остается неустранимым: изображения звезд получаются в виде штрихов, длина которых пропорциональна времени слежения. Более эффективным является визуальное слежение за объектом, обладающее целым рядом ценных положительных качеств, хотя оно в значительной мере и субъективно.

При панорамном фотографировании можно, направив ось панорамы в полюс видимой траектории объекта (полюс фиксируется приближенно, так как видимая траектория объекта наблюдается не из плоскости его орбиты), получить в случае его достаточной яркости большое число точечных изображений последнего и значительное число опорных звезд вдоль видимой траектории объекта. Однако проникающая сила панорамной камеры не отличается от таковой при обычном, поккадровом методе фотографи-

рования. Невольно мы приходим к выводу о незначительной эффективности панорамного метода по сравнению с покადровым при фотографировании движущихся объектов: непосредственное, прямое использование панорамного метода возможно только для очень ярких ИСЗ.

Однако существует путь, при котором недостатки панорамного метода можно в значительной степени устранить, хотя и не полностью. Этот путь ведет одновременно к значительному повышению проникающей силы комплекса в целом и увеличению точности определяемых положений движущегося объекта, что очень важно при статистических методах обработки результатов наблюдений с помощью ЭВМ. Выше было показано (см. рис. 27), что проникающая сила визуального гида может быть довольно большой, по крайней мере значительно превышающей (на несколько звездных величин) эффективную проникающую силу камеры. Нельзя ли использовать это существенное обстоятельство для повышения проникающей силы всего панорамного комплекса в целом?

На первый взгляд проникающая сила гида непосредственного отношения к проникающей силе фотокамеры не имеет. Это так, если рассматривать гид и фотокамеру как две совершенно отдельные, оптические не связанные друг с другом системы, т.е. поступить консервативно по отношению к проблеме. Но можно рассматривать обе системы как нечто единое, части которого не просто взаимно дополняют функции друг друга, а активно взаимодействуют.

Первую, известную по литературным источникам попытку в этом направлении сделал в 1960 г. Б.А. Фираго в СССР. Он предложил логически обоснованный метод локализации слабых ИСЗ на негативе путем влечатывания в то место, где находится последний, звезд достаточно большого блеска, такого, чтобы они могли оставить заметный след на негативе. Он воспользовался для повышения точности освещаемым крестом нитей в поле зрения гида. При наблюдении самого объекта местоположение его определяется на глаз, но с использованием сетки нитей гида для повышения точности наведения. Чтобы не спутать изображения опорных звезд с изображениями звезд-"реперов", как их называл автор метода, около последних впечатываются несколько их изображений.

Момент наблюдения, для которого определяется положение ИСЗ (а затем и звезд-реперов), устанавливается по звуку затвора фотокамеры. Таким образом, в способе Фираго своеобразно реализуется давно известный в практической астрономии способ "глаз—ухо". Это позволило автору метода получить довольно неплохие результаты при наблюдениях слабых ИСЗ. Такой способ Фираго называл "визуально-фотографическим", так как он до некоторой степени сочетает в себе постоянства визуальной системы с большой проникающей силой и фотографической, позволяющей получать результаты высокой точности путем тщательных измерений положения звезды-репера, впечатанной на том месте, где ИСЗ должен был оставить (но не оставил из-за малого блеска) свой след.

Однако автор после этих первых работ прекратил исследование возможности метода.

В 1963 г. М. Штейнбах, сотрудник фирмы К.Цейс в Иене (ГДР), предложил интересную идею увеличения проникающей силы фотокамеры, развивающую в теоретическом плане идею Фираго. Согласно Штейнбаху, гид и

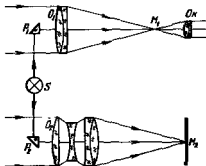


Рис. 35. Оптическая схема системы М. Штейнбаха с искусственным объектом. O_1 и O_2 — объективы гида и фотокамеры, Ok — окуляр гида, S — точечный источник света, P_1 и P_2 — передающие призмы, M_1 — место в поле зрения гида, где совмещены изображения ИСЗ и искусственного репера, M_2 — место в поле изображения камеры, где получается фиктивное изображение ИСЗ.

фотокамера должны иметь строго параллельные оптические оси (рис. 35). Изображение квазиточечного источника света подается оптической делящей системой и в гид и в фотокамеру параллельными пучками. Очевидно, наблюдатель будет видеть при надлежащей юстировке системы изображение светящейся точки как бы в бесконечности на фоне неподвижных звезд (см. рис. 37). На фотопленке изображение этой же точки будет наблюдаться среди звезд там, где его видит наблюдатель в гид. Если теперь совместить появившийся в поле зрения гида ИСЗ с изображением светящейся точки, то на фотопленке получится фиктивное изображение репера на месте слабого ИСЗ, не оставляющего следа на негативе. В этом состоит суть метода Штейнбаха. Конечно, необходимо еще фиксировать момент наблюдения, например, запуская искусственный источник света от хронографа, и тем самым регистрируя момент совпадения изображения ИСЗ в поле зрения гида и изображения точечного источника света.

Практически данная система не имеет ограничения в области проникающей силы для ИСЗ: просто система гида должна быть светосильной, такой, чтобы ей были доступны при визуальном наблюдении самые слабые объекты наблюдения. Заметим попутно, что подобный метод замещения изображения слабого объекта ярким фиктивным был известен уже во второй половине XIX в. и использовался при решении некоторых задач практической оптики, связанных с фотографированием очень слабых по яркости изображений естественных объектов. Но в астрономических исследованиях метод применен, очевидно, впервые. Результаты применения метода неизвестны, вероятно, М. Штейнбах, как и Б.А. Фираго, прекратил исследование.

При тщательном анализе методов Фираго и Штейнбаха оказалось, что они могут быть существенно развиты и кардинально модифицированы с целью получения не одиночных отметок положений наблюдаемых объектов, а рядов положений вдоль дуги траектории произвольной длины. Было также установлено, что для короткофокусной камеры может быть существенно увеличена точность определения положений движущихся объектов.

Путь, по которому эволюционировала идея, был следующий. Заменяем точечный источник света импульсной лампой-вспышкой стробоскопического типа, позволяющей получать очень короткие (длительностью порядка 10^{-5} с) вспышки, запускаемые хронографом от специального приспособления через любые интервалы времени с одновременной регистрацией момен-

тов вспышек. Световая характеристика современных стробоскопических ламп имеет П-образную форму, поэтому можно считать, что вспышка происходит мгновенно и фиксируется с точностью порядка 10^{-3} с 10^{-4} с. Следовательно, моменты наблюдения фиксируются без участия наблюдателя, и тем самым совершенно исключается личная ошибка регистрации моментов наблюдения. Наблюдателю остается только совместить изображение источника света в поле зрения гида с изображением ИСЗ и с помощью микрометрических винтов сохранять это совмещение. Избыточную яркость лампы-вспышки легко подавить с помощью нейтрального серого клина или диафрагмы объектива коллиматора. Соединим теперь гид с панорамной камерой так, чтобы их оптические оси были параллельны, и мы получим визуально-фотографический комплекс. Направив ось панорамы в полюс видимой траектории ИСЗ при некоторой ширине панорамы $2\theta_0$, несмотря на отклонение объекта от дуги большого круга, интерпретирующего видимую траекторию ИСЗ, можно зафиксировать всю видимую траекторию объекта, поворачивая гид вслед за ИСЗ. Для того чтобы компенсировать суточное вращение небесной сферы, необходимо снабдить панорамную установку параллактическим штативом с часовым механизмом. А для того чтобы компенсировать смещение ИСЗ в направлении, перпендикулярном траектории, введем в установку четвертую ось, проходящую точно через вторую главную точку объектива H' , и дадим системе "гид-коллиматор" возможность вращаться около этой оси в пределах некоторого угла, определяемого шириной панорамы $2\theta_0$. Заметим, что при наклонах гида параллельность пучков, входящих в гид и фотокамеру из коллиматора, не нарушается. В этом и состоит самое существенное свойство такой системы.

Полная оптическая схема подобного комплекса приведена на рис. 36. Здесь O_1 , O_2 и O_3 — соответственно объективы гида, коллиматора и фотокамеры, S_1 и S_2 — импульсные источники света, запускаемые хронографом, P_1 и P_2 — пентапризмы малых размеров, передающие световой поток от коллиматора в гид и камеру после его деления призмами P_3 и P_4 . Нейтральные клины K_1 и K_2 служат для регулирования светового потока, идущего в гид и камеру, C — сетка окуляра гида, O — окуляр гида, N — наблюдатель, P_9 — призма прямого зрения для изменения хода лучей гида на 90° для удобства наблюдения.

Вся эта оптическая система вращается около оси T_1T_2 (она перпендикулярна плоскости чертежа), проходящей через заднюю главную точку объектива фотокамеры, перпендикулярно оси вращения панорамы P_4P_9 . Объектив фотокамеры расположен во вращающейся около оси P_4P_9 подвижной части комплекса вместе с жестко связанной с ней системой "гид-коллиматор".

На рисунке показана еще одна, вспомогательная оптическая система, несущая важную функцию. Она состоит из источника света S_2 , объектива коллиматора O_4 , призмы P_5, P_6, P_7, P_8 , назначением которых является фиксирование, во-первых, отметки оптического центра a и, во-вторых, нанесение координатных меток c на краях панорамы. Впечатывание этих меток происходит при каждой экспозиции. Координатные метки являются ориентированными отметками для установления положений осей измерительной системы на негативе. Отметки же оптического центра необходимы для

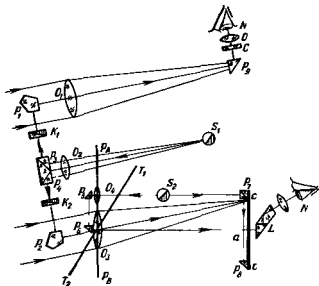


Рис. 36. Визуально-фотографическая панорамная щелевая система с замещением ИСЗ искусственным репером.

создания внутренней системы координат на негативе. Все отметки: репера, оптического центра и координатные, получаемые в один и тот же момент времени, расположены на одной прямой, совпадающей с осью симметрии щели панорамной камеры. Лупа-микроскоп L служит для контроля положений изображения репера от вспышки лампы S_1 , а также для контроля положения оптического центра фотокамеры, осуществляемого визированием сквозь фотопленку. Существенным дополнением к данной системе является нумерация координатных меток. Она может быть легко реализована с помощью устройств, применяемых для этой цели при аэрофотосъемке.

Важным моментом является сохранение жесткой связи между объективом камеры и оптической системой отметок оптического центра и координатных меток при любом возможном положении комплекса относительно горизонта: все эффекты гнутия должны быть тщательно устранены. Вообще, требования к механической и оптической жесткости всего комплекса в целом должны быть очень высокими: нарушение их может привести к возникновению ряда систематических, трудноучитываемых ошибок в результатах наблюдений.

Исследование подобного комплекса можно производить в лабораторных условиях или используя яркий ИСЗ, который сам оставляет легко обнаруживаемый след на негативе. Его фиктивные отметки — реперы, полученные с помощью лампы-вспышки, должны лежать на следе последнего, если система хорошо оъяснирована при любых положениях комплекса в пространстве, так что отсутствует гнутие механических элементов, несущих оптику.

Закон изменения угловой скорости ИСЗ может быть с некоторой, достаточной для практических целей точностью реализован в следящей системе

с помощью механического или электронно-механического устройства. Остаточные уклонения положения объекта по направлению движения и в перпендикулярном направлении могут быть компенсированы с помощью ручного гидирования микрометрическими винтами по осям P_1P_2 и T_1T_2 . Наблюдателю остается следить за тем, чтобы положения изображения объекта и лампы-вспышки в поле зрения гйда все время совпадали с перекрестием сетки нитей С. Если соблюдены все условия, требования которых приведены выше, то в результате мы получим панорамную развертку, схема которой приведена на рис. 37. На нем крестиками обозначены отметки оптического центра ($a, a, a, \dots$), кружками ($b, b, b, \dots$) — изображения репера на месте наблюдаемого объекта и черточками ($c, c, c, \dots$) — координатные метки.

На поле панорамы протяженностью порядка $120 - 140^\circ$ при максимальной угловой скорости объекта до $1^\circ,5 \text{ с}^{-1}$ можно получить не менее $50 - 60$ отдельных положений объекта, при скорости же, меньшей чем $1^\circ,0 \text{ с}^{-1}$, можно получить более 100 отметок. Ограничение числа отдельных положений объекта на панораме определяется только условиями масштаба изображения в центре поля и размерами изображения точечного фиктивного репера на негативе. Оба эти условия зависят только от оптических характеристик объектива системы. Считая размер изображения фиктивного репера равным $0,10 \text{ мм}$ и полагая, что эффекты взаимовлияния изображений при их очень близком расположении, возникающие в процессе проявления, малы, можем допустить в пределе минимальное расстояние между отдельными изображениями не менее одного миллиметра. Но так как измерения очень близких объектов вызывают затруднения, то примем за оптимальное расстояние 2 мм . Тогда для нашего базового объектива число отдельных положений, которое можно получить за одно прохождение объекта над горизонтом, составит около 500; этого будет более чем достаточно для получения полнейшей информации об ИСЗ за его одно прохождение.

Описанный панорамный комплекс должен иметь четырехосную систему штатива. Наличие в ней экваториальной системы осей позволяет в процессе

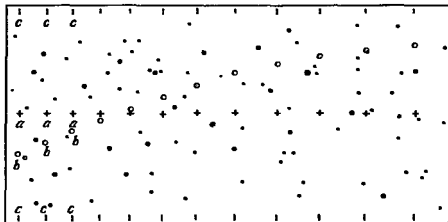


Рис. 37. Схема развертки панорамного снимка.

наблюдения получать на панораме непрерывное поле опорных звезд, изображения которых такие же, как при обычном, покaдровом, фотографировании, точечные. В этом состоит еще одно важное преимущество панорамного комплекса: на панораме можно иметь одно неразрывное поле опорных звезд для определения координат объекта. Это поле можно реализовать при цепном методе, когда используется "плывущая" вдоль траектории объекта группа опорных звезд, часть которых отбрасывается в процессе измерений и замещается новыми.

При большой площади панорамы необходимое число опорных звезд имеется практически всегда, поскольку это число обеспечивается предельной звездной величиной опорных звезд. Приняв в качестве последней восьмую звездную величину, получим на всей площади панорамы несколько тысяч звезд: примерно по одной звезде на квадратный градус, ибо число звезд до восьмой величины составляет почти 41 000, а площадь поверхности сферы равна 41 253 квадратных градуса. Таким образом, на панораме всегда есть возможность для выбора опорных звезд. Если на панораме есть отметки оптического центра и координатные отметки, возможно введение внутренней системы координат, связанной с этими отметками. Такой прием несколько понижает точность определения положений объектов, но значительно повышает скорость измерений и вычислений.

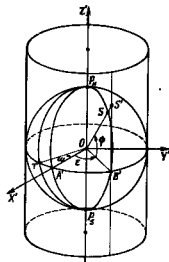
§ 11. Преобразование координат при панорамном фотографировании

Преобразование сферических координат в цилиндрические и обратно широко применяется в различных областях науки, поэтому мы воспользуемся уже известным математическим аппаратом для решения конкретной задачи связи координат на астронегативе и экваториальных координат на небесной сфере объекта. При панорамном методе фотографирования имеет место одно обстоятельство, которое значительно упрощает решение задачи преобразования координат: радиус цилиндрической системы координат равен фокусному расстоянию оптической системы, строящей изображение на поверхности цилиндра.

Воспользуемся этим и впишем в цилиндрическую поверхность панорамы сферу, касающуюся поверхности по окружности большого круга, при этом центр сферы, находящийся на оси Z' цилиндра, примем за начало координат. Назовем сферу, касающуюся поверхности цилиндра своим экватором, сопровождающей сферой. Пусть оптическая ось системы описывает на поверхности окружность большого круга, это будет иметь место в том случае, когда задняя главная точка объектива H' совпадает с центром сферы O . Если, кроме этих условий, ввести еще одно, при котором координатная ось сферы и ось цилиндра совпадают, то мы получим частный, наиболее простой, случай преобразования координат.

За общее для обеих систем координат начало на поверхности сферы удобно принять точку весеннего равноденствия γ . Построим и свяжем с описанным около сферы цилиндром прямоугольную систему координат с началом в точке O и произвольным направлением оси OX' в плоскости экватора, тогда угол $\angle XOX' = \omega$ в общем случае будет отличен от нуля (рис. 38). Этот угол будем отсчитывать в том же направлении, что и прямое восхождение α . Положение оси OY' определится углом $\omega + 90^\circ$. Светило

Рис. 38. Преобразование сферических координат в цилиндрические. Полярная ось экваториальной системы координат совпадает с осью цилиндрической системы.



на сфере обозначим S , его координаты определятся углами $\omega + \epsilon$ и ψ в экваториальной системе или ϵ и ψ , если за начало отсчета принять произвольное направление оси OX' . Прямоугольные цилиндрические координаты точки S' ("проекции" светила S на поверхность цилиндра) будут тогда выражаться формулами

$$X' = OS' \cos \psi \cos \epsilon = OS' \cos \delta_S \cos \epsilon,$$

$$Y' = OS' \cos \psi \sin \epsilon = OS' \cos \delta_S \sin \epsilon,$$

$$Z' = OS' \cos \psi = OS' \cos \delta_S.$$

Полярные координаты точки S' будут связаны со сферическими координатами соотношениями

$$\epsilon_{S'} = \epsilon, \quad R_{S'} = OB' = f'_0,$$

$$Z_{S'} = B'S' = R \operatorname{tg} \psi = R \operatorname{tg} \delta_S = f'_0 \operatorname{tg} \delta_S.$$

Если совместить направление OX' с OY , то координаты $R_{S'}$ и $Z_{S'}$ изменятся, а координата $\epsilon_{S'}$ станет равна α_S . Развернув теперь цилиндр в плоскость, введем систему координат, называемых в фотографической астрометрии идеальными, с началом в некоторой точке A' на линии оптического центра (рис. 39). Ось η пусть совпадает с направлением к северному полюсу P_N круга, а ось ξ — с положительным направлением отсчета прямых восхождений вдоль экватора сопровождающей сферы. Переходя от угловой метрики к линейной и объединяя постоянные величины в некоторой одной P_0 , получим уравнения

$$\eta_{S'} = Z_{S'} = f'_0 \operatorname{tg} \delta_{S'}.$$

$$\xi_{S'} = \widetilde{rB'} = \frac{2\pi f'_0}{360} \alpha_S = P_0 \alpha_S.$$

Это и будут формулы связи идеальных координат панорамного снимка, развернутого в плоскость, с экваториальными координатами. Обратные им соотношения имеют вид

$$\delta_S = \arctg \frac{\eta_{S'}}{f'_0}, \quad \alpha_S = \frac{\xi_{S'}}{P_0}.$$

В реальных условиях панорамного фотографирования геометрические оси панорамы и небесной сферы не совпадают, их взаимный наклон i может заключаться в пределах от 0 до 90° . Это несовпадение, естественно, несколько усложнит формулы связи идеальных и экваториальных коор-

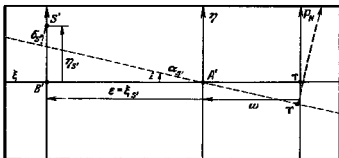


Рис. 39. Развертка панорамы в плоскость. Идеальные координаты точки S' . Если ось вращения камеры не совпадает с полярной осью небесной сферы, то небесный экватор расположится вдоль прерывистой линии.

динат, которые достаточно просто выводятся по формулам сферической тригонометрии.

Направление оси панорамы в пространстве может быть определено и фиксировано с большой точностью, если за полюс панорамы принять какую-либо звезду, находящуюся в непосредственной близости от полюса видимой траектории ИСЗ, принимаемой зв. окружностью большого круга. Этот прием вполне допустим, так как интерпретация видимой траектории ИСЗ большим кругом сферы является приближенной с погрешностью, доходящей, судя по экспериментальным результатам, до одного или даже двух градусов.

С целью вывода рабочих формул для определения экваториальных координат небесного объекта установим связь между измеренными и тангенциальными координатами, поскольку связь координат e и ψ с экваториальными координатами α и δ выведена выше. Влиянием дифференциальной абберации K'' при малых угловых поперечниках $2\beta_0$ панорамы можно пренебречь (рис. 40). Неортогональные члены дифференциальной рефракции могут быть учтены самим методом определения координат, дифференциальная же рефракция $\Delta\rho''_h$ в функции от высоты объекта H над Землей достаточно мала (рис. 41) при высотах, больших 1000 км.

При решении данной задачи с успехом могут быть применены методы А.А. Киселева, или Ф.Шлезингера или же более совершенный метод Тервера. Можно также рекомендовать известный в фотографической астрометрии метод определения координат объекта по двум опорным звездам, предложенный А.Н. Дейчем. Метод Дейча позволяет получить точность определяемых координат до $\pm 0'',1$. Формулы способа Дейча здесь не приводятся — отсылаем интересующихся к курсам фотографической астрометрии. Заметим только, что в самом общем случае формулы Дейча несколько громоздки для случая покадрового фотографирования. Преобразование этих формул для использования в цилиндрической системе координат приводит к значительным упрощениям. Дело в том, что в случае панорамной системы координат можно использовать преимущество, заключающееся в наличии ряда отметок оптического неутра на панорамном снимке, которые можно частично использовать вместо опорных звезд.

Охарактеризуем вкратце всю последовательность преобразований координат при обработке панорамного снимка.

1. С помощью координат полюса видимой траектории объекта, аппроксимируемой окружностью большого круга, преобразуем экваториальные координаты опорных звезд поля панорамы в сферические координаты сопровождающей сферы и в этой системе координат находим положения отметок оптического центра. В идеальном случае последние должны лежать на окружности большого круга — экваторе сопровождающей сферы.

2. Находим начальную точку отсчета на экваторе сопровождающей сферы, используя положение полюса последней.

3. Принимая отметки оптического центра за опорные, по их положениям находим координаты объекта.

4. Преобразуем координаты сопровождающей сферы в экваториальные.

Преимуществом такого рода преобразований, несмотря на некоторые избыточные операции, является то, что одна из координат, ξ , в цилиндрической системе не тангенциальна.

При обработке результатов с помощью ЭВМ многочисленность этапов преобразований координат не имеет существенного значения, так как машинное время увеличивается незначительно.

Непрерывное по всей панораме распределение отметок оптического центра и системы опорных звезд поля допускает использование последних в "цепном" методе определения координат объекта. Большое число опорных звезд и отметок оптического центра допускает в данном случае очень эффективное применение статистических методов обработки результатов измерений и, следовательно, позволяет увеличить точность и надежность выходной информации в целом. В этом состоит несомненное преимущество панорамного метода фотографирования по сравнению с покадровым.

Недостатками рассмотренного метода, присущими только панорамному (целовому) фотографированию, являются такие:

1. Идеальные координаты η и ξ сильно зависят от масштаба снимка по его осям, последний же, как показано, может испытывать значительные изменения по целому ряду причин. К таким причинам следует отнести деформации, влияние процессов обработки и хранения, старение фотоматериалов, изменение фокусного расстояния системы за счет термических факторов и т.п.

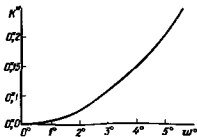


Рис. 40. Дифференциальная абберация в функции от угла поля ω .

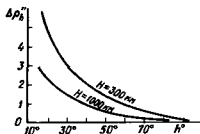


Рис. 41. Дифференциальная рефракция в функции от высоты h для двух высот H объекта над Землей.

2. Трудно наблюдаемым является условие перпендикулярности оси вращения объектива панорамной камеры к оптической оси ее объектива. Это условие может при недостаточной жесткости механической системы комплекса нарушаться в процессе фотографирования, вызывая ошибки, которые учесть трудно.

3. Применение внутренней, связанной только с самим негативом системы координат в фотографической астрометрии считается явлением весьма нежелательным для решения задач, требующих высокой точности.

Частичное ослабление влияния указанных недостатков, может быть достигнуто при обработке результатов измерений применением метода сглаживания длинных рядов наблюдений. Панорамный метод наблюдения быстродвижущихся объектов с преобразованием изображения реального объекта и визуальным слежением за последним позволяет наиболее эффективно применять сглаживание еще и по той причине, что ряд полученных на снимке положений репера неразрывен и монотонен на всем своем протяжении. Ценным обстоятельством можно считать также то, что изображения исследуемого объекта следуют через строго одинаковые интервалы времени, регистрируемые хронографом с высокой точностью. Поэтому сглаживание можно вести с использованием независимого параметра времени — отдельно по координатам X и Y . Такой прием не только увеличивает точность сглаживания, но и устраняет необходимость его повторения.

Поскольку ряд отметок фиктивного репера имеет постоянную яркость в противовес реальному объекту, который может изменять яркость в очень широких пределах, отпадает необходимость в учете уравнения яркости при измерении негатива. Можно считать, что результаты измерения всех положений объекта равнозначны. Отметки положений оптического центра также имеют одинаковую яркость. Оптическая система визуально-фотографического комплекса позволяет выравнивать яркости отметок оптического центра и объекта, поскольку они оба получены с помощью искусственного источника света. В этом случае уравнение яркости между ними будет отсутствовать. Следует отметить еще, что и ряд отметок оптического центра также может быть подвергнут операции сглаживания, что, несомненно, улучшит окончательные результаты определений положения объекта.

В любом случае при использовании визуального гидирования при фотографировании быстродвижущихся небесных объектов имеет место рассеяние получаемых положений относительно истинного места в силу ряда причин. К ним можно отнести такие, например, как несоответствие скорости съезжения объекта, вычисленной по эфемеридам, за счет ошибок предпочтения, присущих каждому наблюдателю, за счет атмосферных факторов (особенно при небольших высотах над горизонтом) и других причин. Особо много неприятностей доставляют деформации фотопленки.

Для иллюстрации эффективности метода сглаживания длинных рядов наблюдений используем метод Гаусса, основанный на способе наименьших квадратов. Для обработки по методу Гаусса, так как сглаживание начинается осреднением по 20 положениям, необходимо, чтобы ряд сглаживаемых величин состоял не менее чем из 21 члена, число которых постепенно сокращается при осреднении в процессе сглаживания.

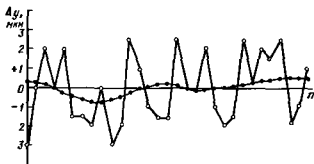


Рис. 42. Иллюстрация эффекта сглаживания измеренных положений звезды. Светлые кружки — измеренные положения, черные кружки — сглаженные положения; n — номер точки

В качестве примера рассмотрим сглаживание измерений ряда фотографических положений звезды δOr , полученных с помощью панорамной фотокамеры, снабженной базовым объективом. С целью максимального исключения атмосферного дрожания и рефракционных эффектов фотографирование велось вблизи меридиана: начало до кульминации, конец — после, на равных удалениях от меридиана, чтобы получить симметричный снимок. Выбранная звезда имеет почти нулевое склонение, большой блеск и ранний спектральный класс. Два последних условия позволили уменьшить входное отверстие системы, что улучшило метрологические характеристики ее, и использовать очень короткие экспозиции для получения квазиточечных изображений звезды. Разрывы осуществлялись при помощи медленно вращающегося обтюратора. В результате получен трек звезды, состоящий из 51 дискретного изображения. На рис. 42 показаны результаты измерений положений звезды по оси Y в виде ломаной кривой. Сглаженные положения показаны в виде черных точек. Эффект сглаживания виден достаточно хорошо. В полном согласии с теорией сглаживание улучшает положение определяемых объектов в 4,0–4,5 раза. Повторное сглаживание улучшает результаты всего на 10%, что делает его практически ненужным.

В случае наблюдений ИСЗ процесс сглаживания проявляет себя также положительно, что можно видеть на рис. 43, где приведены результаты сглаживания по обеим осям координат. Несглаженные положения группируются внутри некоторого

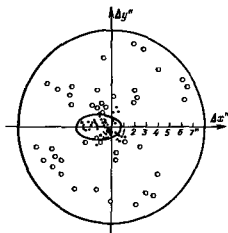


Рис. 43. Эффект сглаживания положений ИСЗ, полученных с помощью панорамного комплекса. Кружки — измеренные положения, точки — сглаженные.

круга, радиус которого равен вычисленному параметру рассеяния положений. Наблюденные результаты изображены в виде кружков, сглаженные — в виде точек. И здесь эффект сглаживания виден достаточно хорошо. Рис. 43 характеризует и еще один достойный внимания эффект: влияние личного уравнения наблюдателя на дисперсию положений гидрируемого объекта. Ошибки гидрирования вдоль траектории ИСЗ больше, чем в перпендикулярном направлении. Это — прямое следствие того, что по эфемеридам угловая скорость объекта программируется в целях ее реализации с помощью механизма слежения хуже, чем отклонения видимой траектории от окружности большого круга, аппроксимирующей эту траекторию. Наблюдателю трудно корректировать систему в направлении движения объекта. Сглаживание увеличило точность положений по обеим координатам почти в пять раз, а повторное сглаживание, так же как и в предыдущем примере, всего на 10%.

Применение метода аподизации входного отверстия системы дает возможность получить дополнительный выигрыш в точности положений быстроперемещающихся объектов за счет хотя бы одномерного улучшения метрологических характеристик оптики, но этот эффект зависит от многих сопутствующих факторов и не может прогнозироваться при использовании какой-либо фотографической системы заранее иначе, как приблизительно. Применение аподизации требует тщательных специальных исследований оптической системы с целью выяснения возможностей эффективности метода.

§ 12. Роторная панорамная камера для фотографирования метеоров

В предыдущих параграфах показаны некоторые возможности панорамной фотографии в одном из разделов современной фотографической астрометрии — фотографических определениях положений искусственных спутников Земли. Основное отличие этого класса небесных объектов — большая скорость движения в пространстве вблизи земной поверхности и, как следствие, большая угловая скорость перемещения на фоне неподвижных звезд.

Возможно ли применение панорамного метода фотографирования для исследования метеоров, обладающих угловыми скоростями, на порядок более высокими, чем угловые скорости ИСЗ? Метеорные явления — пожалуй самые многочисленные из необычных явлений на небе, они известны с незапамятных времен и всегда вызывали законное любопытство людей. Естественно, что и ученые уделяли и уделяют в настоящее время много внимания этим явлениям природы. Метеорные явления доступны наблюдениям невооруженным глазом с помощью визуальных оптических средств (светосильные широкоугольные телескопические системы), с помощью фотографических средств самого разнообразного типа (но во всех случаях — короткофокусных). Радиотехнические методы также широко используются при метеорных исследованиях. Есть много оснований полагать, что в самом ближайшем будущем для исследования метеорных явлений будут привлечены лазерные методы.

Массовые наблюдения метеорных явлений ведутся практически на всем земном шаре как отдельными наблюдателями, так и целыми коллективами.

ми, объединенными общими интересами на специальных астрономических станциях и обсерваториях, несколько неравномерно распределенных на поверхности Земли. Наблюдения метеорных явлений настолько важны, что в астрономии существует целая отрасль, называемая метеорной астрономией. Ее задачами являются определение траекторий метеорных тел в атмосфере Земли и за ее пределами, изучение взаимодействия метеорных тел с земной атмосферой и в некоторых случаях с твердой поверхностью Земли. Исследование структуры метеорных тел, их химического состава, происхождения и эволюции - все эти вопросы также относятся к области метеорной астрономии.

Несмотря на широкое внедрение в практику метеорной астрономии радиолокационных и иных методов исследований, фотография до сих пор остается и, вероятно, еще долго останется наиболее информативным методом в данной области. С помощью фотографии решаются задачи об определении траектории метеорного тела в атмосфере Земли, об определении скорости вторгшегося в атмосферу Земли тела, об изменении этой скорости на различных участках траектории, а также исследуются сопутствующие физические процессы, позволяющие делать некоторые выводы о строении, химическом составе и термодинамических условиях в атмосфере Земли на различных высотах. С помощью фотографии можно определить яркость метеора, получить и исследовать его спектр, а следовательно, химический состав, что особенно важно, так как подавляющее число метеорных тел не достигает поверхности Земли, испаряясь в атмосфере.

Основная особенность метеорных явлений состоит в том, что они обладают очень большими угловыми скоростями перемещения, наблюдаемыми с поверхности Земли. Поэтому метеорные явления очень кратковременны: как правило, время их движения в пределах земной атмосферы порядка одной секунды. Длина следа метеора мала и для 90% их угловая величина заключена в пределах $4 - 8^\circ$. По времени пролета Δt метеоры распределяются также неравномерно, это время варьируется в очень широких пределах, но максимальное число метеоров имеет время пролета, заключенное в интервале от 0,2 с до 0,4 с. По яркости метеоры распределяются так, что максимум яркости, естественно, приходится на болиды, которые составляют всего около 3% от всех наблюдаемых метеорных явлений. По несколько расплывчатой и неодинаковой в разных странах классификации болиды имеют яркость выше -3^m и характеризуются, кроме яркости, еще целым рядом специфических признаков (сопровождающие полет акустические эффекты, наличие длинного, до 50° , следа, выбросы в виде искр из главной части и т.п.). Подавляющее количество метеоров, свыше 80%, имеет яркость от 3^m и слабее. Все эти физико-кинематические характеристики и определяют особенности метода метеорных явлений.

Метеорные фотокамеры должны быть, в идеале, широкоугольными, светосильными, короткофокусными (фокусное расстояние порядка 30–100 см). Они должны быть снабжены механизмом для прерывания изображения следа метеора во время пролета последнего в поле зрения камеры, а также устройством для фиксации момента времени пролета. Как видим, требования к метеорным фотокамерам достаточно велики.

В настоящее время можно считать, что универсальной метеорной фотокамеры, удовлетворяющей всем поставленным требованиям, нет. Выше упоминались "камеры всего неба", обладающие полем до 180° , однако эти камеры не удовлетворяют практически ни одному из остальных, названных выше требований. Существуют особые светосильные камеры с относительным фокусом $V \sim 0,5$ (в частности, камеры, разрабатываемые в СССР Г.М. Поповым). Но они имеют все остальные очень малые параметры и, следовательно, также не удовлетворяют предъявляемым требованиям. Сконструированная в США сверхсветосильная метеорная камера на основе идеи Шмидта, так называемая камера "Супершмидт", также не обладает всеми необходимыми для исследования метеоров качествами. Поэтому совершенно естествен поиск решений, хоть немного приближающих к идеальным. Одно из таких "поисковых" решений возможно на базе панорамного метода фотографирования с нетривиальным решением задачи о прерывании изображения следа метеора.

Зададимся некоторыми условиями, определяющими параметры панорамной фотографической установки, предназначенной для исследования метеорных явлений. Чтобы получить исчерпывающую информацию о всех метеорных явлениях на поверхности видимой полусферы, необходимо рабочее поле порядка 160° . Кроме того, проникающая сила камеры должна быть высокой, чтобы обеспечить регистрацию слабых объектов. Разрешающая способность оптической системы и ее масштаб должны обеспечивать возможность точных измерений положений метеорных следов и их структуры. Для удовлетворения требований фотометрии необходимо, чтобы световое уравнение поля было незначительным. Кроме того, установка должна иметь только один, тщательно исследованный объектив. Желательна всего одна перезарядка фотоматериала за весь сеанс наблюдения (за ночь, например). Все эти до некоторой степени несовместимые требования трудно сочетать в одной установке, если пойти по консервативному пути — пути создания обычной оптической системы. Если же пойти по пути использования особых качеств панорамного метода фотографирования, то можно попытаться найти более или менее приемлемое решение поставленной задачи.

Предположим что имеется объектив с фокусным расстоянием 200 мм, диаметром 70 мм и рабочим полем до 80° . Заметим, что фотографические объективы с подобным сочетанием параметров успешно разрабатываются и уже находят применение на практике. Чтобы сфотографировать всю поверхность видимой полусферы, начиная от высот порядка 10° над горизонтом, необходимы, если пользоваться обычными известными методами натрульной метеорной службы, четыре фотокамеры с подобными объективами. Если же необходимо большое перекрытие, то камер нужно пять. Попросту говоря, светосильная оптика подходящих параметров позволяет лишь уменьшить число камер метеорного патруля. Все остальные проблемы остаются нерешенными или ограниченно решенными.

Но можно предложить и другой путь использования положительных качеств нашего объектива. Установим наш объектив в панорамную систему, но не с цилиндрической разверткой поля изображений, а с конической, на которой располагается фотопленка, специальным образом вырезанная в виде части кольца. Схема такой установки показана на

Рис. 44. Оптическая схема панорамной конической роторной камеры.

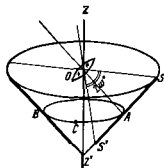


рис. 44. Назовем ее роторной, поскольку объектив расположен на вращающемся роторе. Оптическая ось этой установки описывает в пространстве своим концом не окружность большого круга, а окружность некоторого малого круга $BCAB$. Задняя главная точка объектива должна, как и при цилиндрической развертке, лежать на оси панорамы, роль которой теперь играет ось $Z'Z$ кругового конуса.

Угол, под которым из задней главной точки объектива видна образующая конуса, есть угол поля объектива $2w^\circ$, и поскольку последний составляет 80° , на поверхности конуса можно путем сканирования щелью SS' получить изображение поверхности сферы от горизонта до высоты 80° , если ось вращения $Z'Z$ направлена в зенит. Таким образом, отпадает необходимость применения нескольких систем подобного же типа для фотографирования почти всего неба. Расположив оптическую ось так, чтобы луч OS' расположился вдоль прямой ZZ' , можно добиться того, что область над горизонтом высотой около 10° останется незафиксированной. Это рационально, ибо на малых высотах вероятность обнаружения метеорных явлений, как показывает практика, мала. Чтобы решить вопрос о прерывании изображения следа метеора во время пролета, заставим объектив O со щелью в его фокальной плоскости (в непосредственной близости от последней) вращаться со скоростью порядка 20 оборотов в секунду. Такая скорость вращения вполне допустима для оптической системы с указанными выше параметрами. Тогда, где бы ни пролетал метеор, изображение его следа будет разорвано столько раз, сколько оборотов за время пролета делает объектив.

Близок к решению такой задачи был Е.Н. Крамер, предложивший применять прерывающее свет метеорного тела приспособление — обтюратор — в непосредственной близости от поверхности фотопленки для того, чтобы можно было получать квазимигновенные изображения метеоров, несущие информацию о структуре облака паров, окружающего метеорное тело при пролете в атмосфере Земли.

Задача регистрации момента времени пролета метеора была успешно решена Крамером. Он применил для прерывания следа обтюратор особого типа с неравномерной шириной просвета между лопастями. Помещенный перед объективом фотокамеры такой обтюратор формировал разрывы изображения следа метеора в фокальной плоскости с различным соотношением длин; измеряя последние и зная программу, по которой изменяется отношение разрывов (или длин отрезков изображения следа метеора), можно определить с некоторой точностью момент пролета метеора.

В предлагаемой роторной панорамной установке с разверткой на поверхность конуса можно использовать идею Крамера, поместив в фокальной плоскости щель, состоящую из двух рядом расположенных переменных по ширине щелей таких, чтобы их суммарная ширина (угловая) была

всегда постоянной величиной. Меняя соотношение ширин обеих компонент, можно определять момент пролета метеоров так же, как и в методе Кремера, — никакой принципиальной разницы здесь нет. Изменение ширины компонент щели можно производить путем перемещения непрозрачного промежутка между ними по заданной программе. Технологически этот вопрос вполне разрешим. Конечно, точность такого метода не может быть слишком высокой, она зависит от фокусного расстояния объектива и качества изображения в поле изображений, а также от угловой скорости и направления полета метеора.

Посмотрим, как можно сократить число перезарядок фотоматериала — до одной — за весь сеанс наблюдения. Из принципа панорамного фотографирования следует, что эффективная экспозиция для объекта пропорциональна следующим параметрам: чувствительности фотоматериала, ширине щели и угловой скорости сканирования. Светосила системы играет здесь такую же роль, как и при покадровом фотографировании.

Рассмотрим случай, когда панорамная установка снабжена параллактическим штативом с часовым механизмом для слежения за суточным вращением небесной сферы. Далее, пусть ось вращения ротора направлена параллельно оси вращения небесной сферы. Тогда на конической развертке получим снимок части поверхности сферы, на котором звезды будут иметь форму точек, независимо от того, с какой скоростью вращается ротор камеры. Просто за время одного оборота будет производиться практически мгновенная экспозиция для всех звезд, попадающих в поле камеры. Если обозначить время этой экспозиции через T_e , а число оборотов ротора через $n \cdot c^{-1}$, то суммарное время экспозиции T_Σ в течение работы камеры за промежуток времени ΔT может быть определено как $T_\Sigma = \Delta T \cdot T_e \cdot n \cdot c^{-1}$. Таким образом, если время экспозиции равно 0,002 с, а число оборотов в секунду равно 20, то за 10 часов непрерывной работы роторной камеры произойдет накопление времени экспонирования для звезд всего 24 минуты. Это время меньше допустимого времени фотографирования с нашей оптикой и в течение него не произойдет вуалирования негатива фоном неба с потерей проникающей силы. Следовательно, возможно заряжать роторный комплекс только один раз за весь сеанс фотографирования.

Остаются под сомнением только требования высокой светосилы системы, ее высокой разрешающей способности и незначительного светового уравнения поля. Однако нами не ставилась задача создания идеальной фотокамеры, удовлетворяющей всем требованиям метеорной астрономии. Это, вероятно, задача будущей оптики с асферическими поверхностями, которая, по сути дела, только начала развиваться путем разработки технологии изготовления асферических поверхностей и их контроля.

При фотографировании с произвольно расположенной в пространстве осью вращения ротора, но при условии слежения по часовому углу будут получаться результаты, аналогичные рассмотренным. Если же ось вращения ротора направлена в зенит при неподвижной установке камеры, то на панорамной конической разработке изображения следов звезд будут получаться растянутыми. Длина следов звезд (при большой скорости вращения ротора эти треки будут, естественно, непрерывными) пропорциональна времени работы роторного комплекса.

Измерения изображений следов метеоров на конической панорамной развертке не представляют особых затруднений, хотя и требуют некоторых особых приемов, так как необходимо применять преобразование конической проекции в сферическую или обратно.

Информационная емкость панорамного роторного снимка велика по сравнению со снимком такого же по площади участка небосвода, но составленного из нескольких кадров — мозаичного комплекса. На роторном снимке изображение следа метеора, если последний зафиксирован оптической системой, целиком располагается на одном негативе. В случае мозаичного комплекса след может оказаться на поле одного, двух или даже трех снимков, что значительно затрудняет как фотометрические редукции, так и угловые измерения.

При всех своих достоинствах роторный панорамный метод фотографирования метеорных явлений обладает и заметными недостатками, к числу которых, по нашему мнению, следует отнести следующие:

1. Механическая сложность балансировки ротора: при большой скорости вращения последний начинает вибрировать и деформироваться под действием динамических перегрузок. Поэтому требуется очень массивная установка во избежание вибраций подвижной части системы.

2. Фотопленка, заряжаемая в комплекс, имеет форму конической развертки. Требуется шаблон для выкройки пленки.

3. Зарядка комплекса несколько затруднена: для ее осуществления необходимо снимать ротор.

Все затруднения, связанные с особенностями роторной панорамной камеры, возрастают пропорционально примерно третьей степени диаметра объектива. По нашему мнению, наиболее успешно применение такого комплекса в экспедиционных условиях, когда масса, размеры и прочие параметры комплекса имеют большое значение. Важным достоинством такого рода комплексов является то, что они не требуют непрерывного обслуживания их наблюдателями: установка может быть полностью автоматизирована, необходим только ее запуск в начале сеанса фотографирования и установка в конце для перезарядки и обработки полученного материала.

§ 13. Некоторые другие применения панорамного фотографирования

Панорамная фотография может найти себе применение при самых разнообразных астрономических исследованиях. Рассмотрим вопрос о возможности использования положительных качеств панорамной фотографии при патрулировании Млечного Пути с целью раннего обнаружения новых объектов. Эффективность панорамного патрулирования может быть оценена только в том случае, когда хорошо известны общие характеристики объекта исследования. Статистические данные об открытии новых объектов (под этим термином мы объединяем все объекты, которые обнаруживают не в результате основного на эфемеридных расчетах ожидания) содержатся в Общем каталоге переменных звезд (ОКПЗ). Наиболее подробные данные о новых объектах, обнаруженных за последние десятилетия, позволяют представить суждения об их распределении по каким-либо признакам. Подавляющее число новых объектов сосредоточено в пределах широт $\pm 25^\circ$ — около 90%. В зоне галактических широт $\pm 15^\circ$ — около 83%, причем

в южном галактическом полушарии новых объектов несколько больше, чем в северном. Обращает на себя внимание резкая концентрация новых объектов в интервале долгот $350-30^\circ$: в ней обнаружено их почти 45% от общего числа за данный период. Следует заметить, что около трети Млечного Пути недоступно наблюдениям с территории СССР. Максимальное число новых объектов имело блеск в пределах 12^m-16^m (около 75% от всего числа). Особо отметим здесь, что минимальный блеск некоторых объектов достигает иногда почти двадцатой звездной величины.

Теперь, опираясь на приведенные данные, можно рассчитать, при каких условиях панорамное патрулирование Млечного Пути эффективно. Очевидно, что ширина панорамы, обеспечивающая эффективное патрулирование всего Млечного Пути, должна составлять не более 40° . Поскольку сканирование должно вестись вдоль экватора Млечного Пути, панорамная камера должна иметь трехосную установку: параллактическую с часовым механизмом и третью ось для сканирования в течение сеанса фотографирования. Эта ось должна быть направлена в полюс Млечного Пути. Пользуясь тем обстоятельством, что около последнего есть довольно яркая звезда (около $+5^m,5$) на расстоянии почти 1° , можно принять ее за полюс Млечного Пути и тем самым облегчить себе работу по подготовке панорамной камеры к наблюдениям. Это же обстоятельство позволит вести непрерывный контроль за положением оси вращения панорамы в процессе наблюдения.

С целью получения за одну рабочую ночь, например, полной панорамы Млечного Пути сканирование последнего рационально вести с запада на восток. При диаметре объектива 200 мм, относительном фокусе $V \sim 2,5$ и ширине щели, максимально допустимой для данной оптической системы, можно, применяя высокочувствительные фотоматериалы, получить уверенно отождествляемые объекты до $+15^m$, что согласуется с данными об эксплуатации камер с подобными параметрами при самых разнообразных астрономических исследованиях. Нужно помнить, что эффективное время экспозиции в любой точке фотослоя не должно превышать при указанных параметрах оптической системы 5-7 минут, так как подобный объектив за более длительную экспозицию даст сильно передержанный снимок для звезд ярче $+5^m$. При длительности сеанса фотографирования 6-7 часов мы при оптимальной ширине щели получим величину эффективного времени экспозиции порядка 12 минут. Но ограничение эффективного времени экспозиции сверху легко достигается изменением ширины щели до нужных пределов, и поэтому не следует беспокоиться о том, что негатив будет передержанным.

Расчет продолжительности сеанса фотографирования можно легко сделать с помощью *Астрономического Ежегодника СССР*, в котором имеются сведения о моментах восхода и захода Солнца, а также эфемериды Луны: последние необходимы для расчета условий освещенности небосвода при выборе периодов, в течение которых возможно патрулирование. Влияние лунного освещения можно ослабить, уменьшив ширину щели, но при этом получить проигрыш в проникающей силе.

Панорамное патрулирование, наподобие метеорного, может быть автоматизировано, если не полностью, то частично, контролем работы патруля через некоторые промежутки времени, определяемые как задачами патру-

лирования, так и техническими особенностями натруля (точность хода часового механизма параллактической установки, механическая и термическая стабильность последней и т.п.).

Исходя из того, что камера должна иметь светосильный объектив, ее гив должен быть таким, чтобы возможности этого объектива были реализованы полностью. Камера должна быть построена по идее Дамуазо - с перемещением фотопленки в процессе сканирования, в противном случае протяженность панорамы может оказаться недостаточной для выполнения поставленной задачи.

Сложным вопросом следует считать изучение полученного материала с целью обнаружения новых объектов. Панорамный снимок при максимальной звездной величине самых слабых объектов порядка пятнадцатой содержит такое количество звезд, что даже просмотр панорамы становится сложным и трудоемким, не говоря уже о детальном исследовании полученного снимка. Выходом из такого положения может быть следующий. При наиболее хороших условиях наблюдения нужно получить снимки каждой зоны Млечного Пути и тщательно изучить их. Такие снимки будут служить своеобразными эталонами для сравнения последующих, полученных при патрулировании. Сравнение "эталонного" снимка с натрульными должно быть автоматизировано, иначе патрульная служба станет неэффективной из-за очень больших затрат времени на просмотр негативов. Разработка автоматической фотоэлектрической поисковой системы представляет собой совершенно самостоятельную сложную задачу, на которой здесь мы не будем останавливаться. Заметим только, что такая система не только принципиально возможна, но и существует на некоторых астрономических обсерваториях.

К описанной задаче примыкает задача патрулирования зон эклиптики с целью обнаружения комет. Обычно открытие комет происходит в результате визуальных, специально поставленных для этой цели наблюдений с помощью светосильных широкоугольных телескопов, чаще всего бинокулиров, поскольку бинокулярное зрение намного эффективнее монокулярного. Наблюдатели шаг за шагом осматривают зоны, в которых, по их мнению, вероятнее всего могут быть обнаружены кометы. Конечно, есть много оснований сравнивать подобное занятие с рыбной ловлей. . . Тем более, что эффект пропорционально одинаков: кометы открывают очень редко, так что само открытие есть в большей своей части явление случайное.

Применение фотографических методов внесло свою лепту в это трудное занятие, частота открытий в последнее время значительно увеличилась, хотя открываемых комет все еще мало. Фотографический метод позволяет перенести саму поисковую работу в лабораторию, процесс же получения фотоснимка не особенно длителен. Известны случаи, когда обнаруживалось, что открытая визуально комета была сфотографирована перед открытием, но не обнаружена на снимке, который предназначался для каких-то иных целей, не связанных с поиском новых комет. Одно из хороших свойств фотографии состоит в том, что она может неопределенно долго хранить документальное подтверждение недостаточной внимательности астрономов-наблюдателей. . .

Может ли применение панорамного метода фотографирования интенсифицировать процесс поиска комет или нет? По нашему мнению, может,

и вот почему. Кометы открывают часто в областях, близких к Солнцу, перед восходом или заходом его, там, где обычное фотографирование неэффективно из-за высокой освещенности небосвода. Протяженность областей, в которых обнаружение комет вероятно, составляет довольно значительную величину, что в принципе требует при фотографировании применять широкоугольную оптику с полем порядка $2\omega^\circ = 50^\circ$ или более, но такая оптика, за редкими исключениями, не является светосильной. К тому же при увеличении фокусного расстояния резко растет линейный поперечник поля, что затрудняет использование подобных систем, если они имеют фокусное расстояние более 500 мм. При таком фокусном расстоянии и значении угла поля порядка $2\omega^\circ = 50^\circ$ линейный поперечник поля достигает 450 мм!

Звездная величина открываемых комет не бывает большой, следовательно, необходима светосильная оптика. Применение светосильных систем с диаметром объектива 250–300 мм и фокусным расстоянием порядка 500–1000 мм могло бы увеличить вероятность обнаружения комет при использовании высокочувствительных фотоматериалов. Но по причинам, связанным с ограничениями линейного поля камер, такие системы могут оказаться эффективными только в случае использования их в панорамном комплексе, позволяющем реализовать поля изображений большой протяженности и, следовательно, упростить последующую работу по исследованию снимка в лабораторных условиях.

В движении открываемых комет существует преимущественное направление, устойчивое во времени. Апекс открываемых комет расположен вблизи точки востока, средняя (с очень большими отклонениями) скорость перемещения к востоку составляет величину, близкую к $1^\circ,5$ в сутки. Этот эффект позволяет применить во время поиска комет метод отслеживания в направлении движения последних с указанной скоростью, следствием явится некоторое увеличение проникающей силы фотографической системы в отношении комет. Эффективность подобного метода на примере малых планет проверена достаточно убедительно. Конечно, выигрыш не может быть большим, но если он составляет хотя бы несколько десятых долей звездной величины, то метод стоит применять.

Преимущества панорамного метода фотографирования позволяют использовать их при поиске комет несколько своеобразно. Поставим задачу фотографического поиска комет на утреннем небе в восточной части эклиптики, тогда сканирование можно вести от антисолнечной точки вдоль эклиптики по направлению к Солнцу. Угловую скорость сканирования можно выбирать из условий, учитывающих желаемую проникающую силу, угловую ширину щели и расстояние от Солнца (последнее условие определяет максимальную продолжительность фотографирования). В таком случае, очевидно, влияние фона неба при начале фотографирования будет незначительным; возможно, что в начальный период фотографирования фон будет отсутствовать совершенно. Но по мере приближения области сканирования к восточной части эклиптики освещенность небосвода начнет возрастать — начнутся утренние заревые явления, характер которых трудно учесть из-за наличия разнообразных атмосферных факторов, вызывающих сильное рассеяние световых лучей в областях, близких к местонахождению Солнца.

Заметим, что влияние фона, кроме всех прочих условий, пропорционально ширине щели и скорости сканирования в первом приближении. Поэтому в значительной степени фактор засветки фотоматериала фоном неба окажется при таком методе фотографирования дифференциальным, а не интегральным, как это было бы в случае обычного, покадрового, фотографирования, особенно в поздние, предутренние часы, когда яркость зари значительна. Этот эффект вытекает непосредственно из принципа одновременности экспонирования в различных частях панорамного снимка. Он не очень значителен, но заметно увеличивает информацию, фиксируемую на снимке, снижая фоновую засветку последнего на некоторой части панорамы.

При панорамном методе фотографирования можно использовать и автоматическое, без участия наблюдателя, сканирование. Установка должна быть трехосной — с третьей осью, направленной в полюс эклиптики, с помощью нее и ведется сканирование вдоль эклиптики. Контроль полученных снимков эффективнее всего вести с помощью "эталонного" снимка исследуемой зоны эклиптики.

Просмотр снимка в лабораторных условиях, несомненно, более эффективен и требует от наблюдателя во много раз меньших усилий и затрат энергии, чем в случае визуальных наблюдений, несмотря на то, что при помощи последних возможно обнаружение намного более слабых объектов, чем при фотографировании. Тот, кто пробовал заниматься поиском слабых объектов с помощью светосильного бинокля, особенно в зимнее время при наличии ветра, знает, каких иногда нечеловеческих усилий требует от наблюдателя один даже непродолжительный сеанс наблюдений, скажем, час или два. . . На холоде резко падает коэффициент внимания, уменьшается разрешающая способность глаз, падает проникающая сила и ухудшается способность цветоразличения. Трудности работы с подробной картой звездного неба усугубляют все обстоятельства наблюдений настолько, что эффективность фотографического метода в его панорамном варианте становится вполне очевидной.

Панорамное фотографирование выгодно при наблюдениях протяженных объектов — серебристых облаков и полярных сияний.

Серебристые облака — особый тип объектов, равно интересных как исследователей верхней атмосферы Земли, так и астрофизиков. Впрочем, атмосфера Земли — объект астрофизический, если рассматривать Землю как планету. Возникают эти интересные объекты на высотах от 70 до 90 км в среднем, по известным случаям появления их и на меньших, и на больших высотах. Большой интерес представляют динамика этих образований, их состав, структура, интенсивность свечения, спектр, поляризация света в различных диапазонах длин волн и другие характеристики. В последние годы возрос интерес к весьма вероятным связям как самих появлений облаков, так и их эволюции с состоянием солнечной активности.

Сочетание фотографического метода исследований с другими методами — фотометрией, поляриметрией, астрометрией позволяет получить богатую информацию о серебристых облаках. Однако из литературных источников известно, что при фотографировании серебристых облаков применяется повсеместно почему-то только покадровый метод. При значительной протяженности образований по азимуту мультиплицирование отдель-

ных кадров в единый комплекс большой длины вполне возможно, но требует дополнительных затрат времени, специальной аппаратуры и ведет все-таки в конечном счете к значительной потере информации об исследуемом объекте. Применение панорамного метода фотографирования позволяет избежать указанных отрицательных факторов и получить на одном протяженном кадре информацию о фотографируемом объекте в целом по той или иной методике изучения.

Оставив в стороне вопрос об астрофизической стороне информации, остановимся на чисто астрометрическом аспекте задачи, а также на требованиях к оптике панорамной камеры, предназначенной для фотографирования серебристых облаков. Для максимального сокращения процесса фотографирования во времени необходимо как можно более светосильная оптика с небольшим фокусным расстоянием, 50–100 мм. Отсутствие локальных (квазиточечных) образований в структуре серебристых облаков в общем случае позволяет применять в качестве питающей оптики системы с ограниченными параметрами, поскольку точность измерения снимков этих образований, с учетом их диффузного характера, судя по накопленному в этой области исследований опыту, достаточна — порядка $\pm 0,1$ мм. При фокусном расстоянии 50 мм, линейная точность $\pm 0,1$ мм соответствует в масштабе камеры погрешности в определении угла около $6'-7'$, а при фокусном расстоянии 100 мм — соответственно около $3',0-3',5$.

Эффективное время экспозиции при фотографировании не должно превышать в любой точке снимка двух минут, так как движение отдельных элементов облаков приводит в противном случае к смазыванию их изображения. Скорость изменения яркости отдельных элементов объекта такого же порядка. Возникает совершенно справедливый вопрос о одновременности экспонирования отдельных элементов объекта во времени с помощью щелевой панорамной фотографии. Но этот недостаток может быть в значительной своей мере преодолен многократным сканированием объекта в процессе фотографирования со скоростью, превышающей таковую для получения изображения при однократном сканировании. Такой прием в принципе эквивалентен фотографированию объекта на один кадр в течение конечного времени экспозиции. При этом в отдельных частях панорамы приходится усреднение картины, что, впрочем, происходит и при покадровом фотографировании. Если учесть, что протяженность светящегося объекта нередко превышает 100° , то, несмотря на некоторые недостатки панорамного метода, последний все же оказывается более эффективным, нежели покадровый.

Рассчитав скорость сканирования и ширину щели при известных параметрах оптики объектива, можно найти условия фотографирования, при которых метрологические требования будут соблюдены. Последнее важно в том случае, когда производятся и фотометрические исследования динамики объекта.

Вполне очевидно следующее условие: ось панорамы должна быть направлена в зенит. Однако при этом нижняя половина панорамы будет сканировать изображение земной поверхности, что вовсе не является обязательным при исследовании серебристых облаков (положение горизонта на снимке, конечно, должно быть известно, но его можно получить и другим путем, например впечатыванием специальной миры, расположенной на достаточно

большом расстоянии от фотокамеры). Чтобы избежать такого нежелательного эффекта, уменьшающего полезную площадь снимка, необходимо фотографировать серебристые облака не с помощью цилиндрической панорамной камеры, а с помощью конической, подобной описанной выше роторной, но с малым углом раствора конуса. Последний может быть легко найден при конструировании камеры по известным оптическим параметрам объектива и требуемой высоте панорамы от горизонта.

Линия математического горизонта может быть получена с помощью метода, аналогичного методу получения линии оптического центра с использованием уровня той или иной конструкции: изображение его можно передать с помощью коллиматора в поле изображений камеры. Кроме того, на всем поле панорамы могут быть получены и изображения фотометрических стандартов, необходимых для фотометрии объекта. Нуль-пункт отсчета азимута можно легко получить при постоянной установке панорамной камеры также с помощью репера с известным азимутом, если последний расположен от камеры достаточно далеко. Как и в рассмотренных выше случаях, масштаб по одной координате (азимут) на снимке будет зависеть только от одной постоянной величины: фокусного расстояния объектива камеры; другая координата (высота) будет иметь тангенциальный масштаб. В силу того, что изолинии дисторсии параллельны математическому горизонту при соблюдении поставленных условий, учет последней не представляет особых затруднений. Изолинии уравнения светового поля также параллельны горизонту.

Применение светочувствительных или поляроидов перед объективом панорамной камеры практически не меняет ее метрологических свойств при тех требованиях, которые предъявляются к фотографическому методу исследования серебристых облаков. В случае необходимости получения координат отдельных точек объекта может быть применен метод Дейча в самой грубой форме с учетом требований низкой точности окончательных результатов измерения координат на снимке. В зависимости от характера задачи и технических требований можно применять также камеру Моёссара и камеру Дамуазо. Второй тип, естественно, более компактен и допускает использование оптики с любой светосилой, что в данном случае имеет большое значение. Что же касается значительной сложности камеры типа Дамуазо, то при современных технологических возможностях это не является сколько-нибудь серьезным препятствием при постройке камеры. Оптические параметры панорамной камеры могут иметь самые разнообразные значения.

Полярные сияния наблюдаются с поверхности Земли из пунктов, расположенных на больших широтах, близких к широте полярных кругов, по известным многочисленным случаям наблюдения этих явлений и на широтах $40 - 45^\circ$, например в Греции, Италия. Области возникновения полярных сияний расположены на высотах от 700 до 1000 км; предельная высота, на которой зарегистрировано свечение, составляет почти 1200 км.

Совершенно необычный вид, протяженность, активная динамика формы и цвета обратили на себя внимание исследователей уже в самом начале XVII в.: П. Гассенди, французский философ-материалист, астроном, математик и физик, интересовался природой этих явлений, которые он называл "северной зарей". Природа полярных сияний стала понятной лишь по

второй половине XX в. в связи с развитием теоретических методов космической электродинамики и новейших наблюдательных средств, поступивших в распоряжение исследователей, включая и методы, предполагающие использование ИСЗ.

Одним из наиболее активных методов исследования этих явлений стал фотографический, дающий богатую информацию об изучаемом объекте. В настоящее время для исследования полярных сияний наиболее часто применяются "камеры всего неба", обладающие низкими метрологическими характеристиками, огромной дисторсией и незначительной светосилой. Потери информации при использовании таких систем, естественно, очень велики и с этим фактом наблюдателям приходится мириться, так как у них нет другого выбора. Если к сказанному прибавить, что фотометрические характеристики поля изображений "камер всего неба" оставляют желать много лучшего, станет понятным, каких больших трудов стоит получить при помощи фотографий достаточно полную информацию о физических свойствах объекта. Малое фокусное расстояние "камер всего неба" усугубляет положение: становится весьма трудным определять геометрические параметры объекта и изучать динамику его деталей, тем более, что полярные сияния не имеют локальных образований, которые можно было бы использовать как реперные при измерениях негатива.

Совершенно естественно, что поиски оптических систем, удовлетворяющих требованиям наблюдений подобных объектов, ведутся непрерывно. Но в силу традиций решения ищутся в области сверхширокоугольной оптики, имеющей много теоретических запретов в отношении совместимости параметров светосилы, величины поля изображений и других характеристик. Требования, которым должны удовлетворять такие системы, если они предназначены для фотографических исследований полярных сияний, очень высоки: система должна быть светосильной для того, чтобы максимально сократить время экспонирования объекта, и быть сверхширокоугольной, так как объект имеет очень большую протяженность. Требования фотографической фотометрии заставляют выбирать систему с достаточно удовлетворительным для измерений светораспределением в поле изображений. Желательна незначительная дисторсия (при всех указанных выше требованиях). Наконец, желателен большой масштаб изображения для повышения точности линейных измерений на негативе.

Поскольку оптических систем с требуемыми характеристиками нет и едва ли они появятся в ближайшем будущем, стоит подумать о возможности применить в этой области исследований панорамный метод фотографирования в его роторном варианте. Учитывая характер динамики объекта, можно не требовать больших скоростей вращения ротора при фотографировании. Отсюда следует, что ограничение в геометрических размерах оптики опадает: возможно изготовление совершенно устойчивой в механическом и оптическом отношении роторной установки с объективом, имеющим фокусное расстояние до 500 мм и относительное отверстие порядка $1:2,5 - 1:5$, что уже удовлетворяет всем метрологическим требованиям, касающимся масштаба изображений, и требованиям фотографической фотометрии. Например, такая оптическая система, как "Уран-27", с фокусным расстоянием 100 мм и относительным фокусом $V \sim 2,5$, имеет поле изображений $2\omega^\circ = 57^\circ$. При фотографировании роторной камерой, захва-

тывающей область полусферы от горизонта до высоты 57° , мы теряем информацию только примерно о 18% поверхности последней — около зенита, если ось вращения ротора направлена вертикально. Такая же оптическая система, как "Мир-3", с фокусным расстоянием 66 мм и относительным отверстием $1 : 3,5$ имеет поле $2\omega^\circ = 66^\circ$, при котором потери составят всего около 8% при том же расположении оси вращения ротора.

Высокие метрологические характеристики указанных (или им подобных) систем позволяют в сочетании с панорамным роторным методом фотографирования намного облегчить получение и обработку информации о полярных сияниях. Изменяя частоту вращения ротора, можно получить некоторую информацию о динамике отдельных элементов структуры объектов во времени — наподобие метеорных методов получения отдельных элементов на изображениях следа. Конечно, такой снимок непригоден для фотометрических исследований из-за неизбежного наложения изображений друг на друга. Наличие изображений звезд в поле панорамы позволяет уверенно определить положение объекта в пространстве, а фотографирование с концов базиса делает задачу вполне определенной.

В заключение параграфа несколько слов о панорамном фотографировании заревых явлений при затмениях Солнца. Для анализа хода солнечного затмения важными являются обстоятельства, сопровождающие ход затмения. Одним из них можно назвать заревые явления и их динамику во время затмения. Фотографирование заревых явлений производилось многократно различными методами и, в частности, методом М.М. Дагаева, разработавшим заревый фотометр, принцип которого известен по инструкциям для наблюдения солнечных затмений. Но фотометр Дагаева лишен оптической системы, он является особой разновидностью камеры-обскуры кругового обзора. Метрологические характеристики такого фотометра низки и не могут быть использованы для выяснения пространственной структуры объекта.

Можно существенно улучшить положение, если применить для решения задачи панорамную систему с разверткой до 360° , т.е., например, систему перископического типа. Исходя из особенностей фотографируемого объекта, можно сделать вывод о том, что достаточные для целей исследования результаты можно получить при помощи объектива с небольшим значением относительного фокуса, порядка $V = 10$, что сильно упрощает выбор оптической системы. Заревое кольцо над горизонтом обладает незначительной угловой высотой, поэтому в панорамном комплексе можно реализовать способ перемещения кассетной части кольцевой панорамы в вертикальном направлении в процессе фотографирования, подобно методу Дагаева. Этапом для фотометрических исследований может служить искусственный источник света, примененный по методике, разработанной Н.Н.Сытинской.

§ 14. Сравнение преимуществ и недостатков панорамного и покадрового методов фотографирования в астрономии

Итак, использование панорамного метода фотографирования в сочетании с существующими вспомогательными оптическими системами, не меняя свойств последних, позволяет получить на одном кадре поле изображений, во много раз превосходящее по суммарной площади возможности покадрового метода. Протяженное поле изображений, полученное в течение одного

непрерывного процесса фотографирования, несет в себе очень большую информацию о фотографируемом объекте или множестве объектов. Такое же поле можно получить с помощью покадрового метода, применяя одновременно несколько фотографических камер, обладающих, в идеале, одинаковыми параметрами, но с большим расходом времени и материалов за счет неизбежного перекрытия фотографируемых полей отдельных камер. Кроме того, абберации при покадровом фотографировании имеют двумерный характер, а при панорамном — одномерный.

С достаточно хорошим приближением удельная информация с единицы поверхности поля изображений при панорамном методе будет в $\sqrt{2}$ раз больше, чем при покадровом. В случае применения статистических методов обработки результатов наблюдений, которые для панорамного метода более эффективны, чем для покадрового из-за повышенного количества реализаций наблюдаемых объектов, можно говорить о том, что удельная информация при панорамном методе почти в два раза выше, чем при покадровом. В сочетании с роторным методом сканирования панорамное фотографирование позволяет получить изображение практически целой полусферы, если система снабжена широкоугольной оптикой с углом поля порядка 80° . Становится возможным фотографирование чрезвычайно быстро движущихся объектов на всем протяжении их видимой траектории с незначительной затратой фотографического материала и без частой замены последнего в процессе наблюдения при значительной экономии времени на обработку и измерение снимка.

Патрулирование протяженных областей небесной сферы с целью раннего обнаружения каких-либо новых объектов значительно упрощается тем фактом, что возможно быстрое ручное, полуавтоматическое или автоматическое сравнение панорамных снимков методом наложения последних друг на друга.

Фотографирование ИСЗ и им подобных объектов в непрерывном режиме слежения на всей видимой траектории позволяет получить обширную информацию об этих объектах за время пролета. Метод замещения изображения реального объекта его искусственным изображением с помощью лампы-вспышки дает возможность путем накопления избыточного количества отдельных положений получать более точные значения координат, чем при покадровом методе. Преобразование координат и редукция фотоснимков при панорамном методе проще, чем при покадровом.

Однако панорамный метод фотографирования в целом не лишен и недостатков, в некоторых случаях значительно затрудняющих обработку полученной информации. Например, во время фотографирования таких протяженных объектов, как кометы, полярные сияния, серебристые облака и другие им подобные, неодновременность фиксирования отдельных частей объекта отрицательно сказывается и на окончательной интерпретации результатов, хотя с целью до некоторой степени устранить этот недостаток можно сканировать протяженный объект многократно во время фотографирования.

Различное влияние эффекта рефракции на разных участках панорамы, полученных при фотографировании на разных высотах над горизонтом, добавляет трудности в процессе обработки снимка. Учет дифференциальной рефракции при высоких метрологических требованиях к снимку также

сложен, хотя и вполне возможен. Частичное ослабление влияния эффекта неодновременности фотографирования отдельных частей протяженного объекта возможно путем впечатывания меток времени на краях панорамы — такой прием используется часто и не без успеха. При фотографировании неба с целью раннего обнаружения новых объектов последнее обстоятельство может иметь определяющую роль, когда требуется установить приоритет первооткрывателя.

В фотометрическом отношении существенную роль играет различие запечатленного на панораме фона неба в его разных частях — например при лунном освещении или освещении искусственными источниками света. Для учета фона неба и его различий можно впечатывать по всей длине панорамы фотометрические метки от эталонного источника света. Строгая теория фотометрии протяженных объектов показывает недостаточность такого приема, хотя и допускает его использование в тех случаях, когда другого выхода у наблюдателя нет.

Большое значение имеет учет дисторсии изображения, возникающей при длительных экспозициях; учет ее возможен на всем поле панорамы, так как она пропорциональна измеренным на панораме расстояниям с хорошим приближением. Искажение масштаба изображения в процессе обработки снимка и его хранения может быть с успехом контролируемо путем впечатывания на снимок (до проявления последнего) сетки Готье, являющейся носителем стандартного масштаба.

Попробуем свести все положительные и отрицательные особенности панорамного и кадрового методов в таблицу для удобства их сравнения и сопоставления.

Признак или характеристика, подлежащие сравнению	При кадровом фотографировании	При панорамном фотографировании
1. Оптический центр	Точка	Линия, эквивалентная развертке большого круга сферы на плоскость
2. Система координат	Прямоугольная, обе координаты тангенциальные	Прямоугольная, одна из координат тангенциальная, вторая зависит от масштаба снимка
3. Оси координатной системы	Не заданы ничем, начало обычно в оптическом центре поля снимка	Одна ось задана линией оптического центра, другая ортогональна ей
4. Полус системы сферических координат	Определяется при помощи системы опорных звезд однозначно	Определяется по двум или более отметкам оптического центра однозначно
5. Пространство изображений	Ограничено по обьект координатам величиной угла поля $2\omega^\circ$	Ограничено только по одной координате величиной угла поля $2\omega^\circ$, по другой координате может достигать 360°
6. Световое уравнение поля изображений	Двумерно, в первом приближении является функцией угла поля $2\omega^\circ$	Одномерно, зависит от угла поля только по одной координате, по другой координате постоянно на всей панораме

Признак или характеристика, подлежащие сравнению	При покaдpовом фотогpафировании	При пaнорaмном фотогpафировании
7. Вьюшeтиpовaниe	Аналогично световому уравнению	Аналогично световому уравнению
8. Изолинии аберраций	Двумерны; в первом, грубом, приближении — окружности, concentpичные оптическому центру сдвaткa	Одномерны, в очень хорошем приближении — прямые, paялeльные линии оптического центра
9. Затвop	Центpальный, щелевой, жалюзи, обтopаторный, поляpизованный, Керра	Вообще не требуется, его роль выполняет щель
10. Относительное отверстие во время экспозиции	Сложная функция от констант затвора и величины самой экспозиции	Постоянно в течение всего процесса сканирования. Не зависит от констант затворного устройства
11. Процесс формирования изображения	Зависит как от констант затвора, так и от величины экспозиции	Зависит только от характера самого объекта при малой ширине щели, близкой к диаметру диска Эри
12. Поле опорных звезд	Индивидуальное для каждого снимка	Единое, непрерывное для всей пaнорaмы
13. Перекрытие полей	Достигает 20–40%	Отсутствует совершенно
14. Удельная затpата материала	Принимаем за 100% условно	Порядка 70%
15. Суммарные затpаты времени	Принимаем равными 1,0 условно	От 0,5 до 1,0
16. Точность определения координат	Принимаем равной ϵ	С применением метода сглаживания близка к $\epsilon : \sqrt{20}$
17. Удельная информация со всего поля снимка	Принимаем равной B	Близка к $\sqrt{2} \cdot B$
18. Топологическая характеристика поля изображений	Плоскость; в некоторых случаях — сферическая или цилиндрическая поверхность	Цилиндрическая поверхность, поверхность конуса произвольных параметров

Преимущества панорамного метода фотографирования в случае применения длиннофокусных оптических систем становятся не столь очевидными, как в случае короткофокусных систем, которые могут быть реализованы и как широкоугольные и даже сверхширокоугольные при значительной светосиле. Но в некоторых случаях применение длиннофокусных оптических систем для панорамного фотографирования, вероятно, может оказаться целесообразным по каким-либо причинам, связанным с характером решаемой задачи.

Завершая краткое описание принципов панорамной астрофотографии надеемся, что она найдет более широкое применение в астрономии и смежных науках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Астапович И.С.* Метеорные явления в атмосфере Земли. — М.: Физматгиз, 1958.
2. *Баум У.А.* Обнаружение и измерение слабых источников — В кн.: Методы астрономии. — М., 1967.
3. *Боуэн И.С.* — В кн.: Новые методы в астрофизике. — М.: Мир, 1964.
4. *Вавилов С.И.* Глаз и Солнце. — 9-е изд. — М.: Наука, 1976.
5. *Вокулер Ж., Тексеро Ж.* Фотографирование небесных тел. — М.: Наука, 1967.
6. *Волосов Д.С.* Фотографическая оптика. — М.: Искусство, 1971.
7. *Зоммерфельд А.* Оптика. — М.: ИЛ, 1953.
8. *Глезер В.Д.* К характеристике глаза как соединяющей системы. — Физиологический журнал СССР, 1959, вып. 45.
9. Инструкция по исследованию аппаратуры для фотографических наблюдений ИСЗ. — М.: Астросовет АИ СССР, 1970, Потсдам, 1969.
10. *Катасев Л.А.* Фотографические методы метеорной астрономии. — М.: Гостехиздат, 1957.
11. *Коробко Б.Г.* О зрительной темновой адаптации. — М., 1958.
12. *Кравков С.В.* Глаз и его работа. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1951.
13. Курс астрофизики и звездной астрономии. — 3-е изд. — М.: Наука, 1973.
14. *Ландсберг Г.С.* Оптика. — М.: Наука, 1976.
15. *Луизов А.В.* О видимости быстро движущегося тела. — Проблемы физиологической оптики, 1947, т. 4.
16. *Максутов Д.Д.* Астрономическая оптика. — М.: Наука, 1979.
17. *Максутов Д.Д.* Изготовление и исследование астрономической оптики. — М.: Наука, 1984.
18. *Мартинов Д.Я.* Курс практической астрофизики. — М.: Наука, 1971.
19. *Михельсон Н.Н.* Оптические телескопы. Теория и конструкция. — М.: Наука, 1976.
20. *Подобед В.В.* Фундаментальная астрометрия. — 2-е изд. — М.: Наука, 1968.
21. *Русинов М.М.* Габрильные расчеты оптических систем. — 2-е изд. — М.: Госгеолтехиздат, 1963.
22. *Слюсарев Г.Г.* Методы расчета оптических систем. — М.: Машиностроение, 1969.
23. Справочник конструктора оптико-механических приборов. — 3-е изд. — Л.: Машиностроение, 1980.
24. Телескопы/Под ред. Дж. Койпера и Б. Миддлхерст. — М.: ИЛ, 1963.
25. *Тудоровский А.И.* Теория оптических приборов: Т. I. — 2-е изд. — М.: Изд-во АН СССР, 1948.
26. *Щеглов П.В.* Проблемы оптической астрономии. — М.: Наука, 1980.